ENCICLOPEDIA AGRICOLA

GUSTAVO ANDRÉ

Química Agrícola

Química del Suelo

Casa Editorial P. Salvat.
BARCELONA

ENCICLOPEDIA AGRICOLA

ANDRÉ
QUÍMICA AGRÍCOLA
SUELO

ENCICLOPEDIA AGRÍCOLA

publicada bajo la dirección de G. WERY

GUSTAVO ANDRÉ

QUÍMICA AGRÍCOLA

QUÍMICA DEL SUELO




P. SALVAT
Editor

ENCICLOPEDIA AGRÍCOLA
publicada por una Junta de Ingenieros agrónomos
BAJO LA DIRECCIÓN DE G. WERY

QUÍMICA AGRÍCOLA

QUÍMICA DEL SUELO

POR

GUSTAVO ANDRÉ
PROFESOR DEL INSTITUTO NACIONAL AGRONÓMICO
AGREGADO DE LA FACULTAD DE MEDICINA

INTRODUCCIÓN

POR EL

DR. P. REGNARD
Director del Instituto Nacional Agronómico
Miembro de la Sociedad de Agricultura de Francia.



BARCELONA
CASA EDITORIAL P. SALVAT
39 - CALLE DE MALLORCA - 51
1918

Establecimiento Tipolitográfico de P. SALVAT, editor.—Barcelona.

INTRODUCCIÓN

En justicia no me correspondería á mí firmar este prefacio.

Este honor debería recaer en uno de mis dos eminentes predecesores:

En Eugenio Tisserand, á quien debemos considerar como el verdadero creador en Francia de la enseñanza superior de la agricultura: ¿no es él quien, durante largos años, ha influído con todo su valer científico en nuestros gobiernos, y ha conseguido que se creara en París un Instituto agronómico comparable á aquellos de que nuestros vecinos se mostraban orgullosos hacía tiempo?

Eugenio Risler, también, más bien que yo, habría debido presentar al público agrícola sus antiguos alumnos, que han pasado á ser maestros. Unos mil doscientos ingenieros agrónomos, esparcidos por el territorio francés, le deben su instrucción: él es hoy nuestro venerado decano y yo recuerdo siempre con dulce agradecimiento el día en que debuté bajo su órdenes y el día, hace poco pasado, en que me designó para ser su sucesor (1).

Pero, ya que los editores de esta colección han querido que fuera el director actual del Instituto agronómico quien presentase á los lectores la nueva *Enciclopedia*, voy a tratar de decir brevemente con qué espíritu ha sido concebida.

Ingenieros agrónomos, casi todos profesores de agricultura, todos ellos antiguos alumnos del Instituto nacional agronómico, se han propuesto resumir, en una serie de volúmenes, los conocimientos prácticos absolutamente necesarios hoy para el cultivo racional del suelo. Han escogido para distribuir, regular y dirigir la tarea de cada uno, á Jorge Wery, á quien tengo la suerte de tener por colaborador y por amigo.

La idea directora de la obra común ha sido la siguiente: extraer de nuestra enseñanza superior la parte inmediatamente utilizable para la explotación de la propiedad rural y dar á conocer á la vez á

(1) Después de haber escrito estas líneas, hemos tenido la desgracia de perder á nuestro eminente maestro Risler, el 6 de agosto de 1905, en Salèves (Suiza). Queremos que conste aquí el vivo dolor que nos causa esta pérdida. Eugenio Risler deja á la ciencia agronómica una obra inmortal.

los agricultores los datos científicos definitivamente adquiridos en que la práctica actual está fundada.

No son simples Manuales, ni Formularios sin razonar, lo que ofrecemos á los agricultores; son cortos Tratados en que se han puesto de manifiesto los resultados innegables, al lado de las bases científicas que han permitido llegar á ellos.

Yo quisiera que se pudiese decir que representan el verdadero espíritu de nuestro Instituto, con la restricción de que no deben ni pueden contener las discusiones, los errores en las vías, las rectificaciones que han acabado de fijar la verdad tal cual es, cosas todas ellas que se desarrollan largamente en nuestra enseñanza, porque no debemos formar sólo prácticos, sino también inteligencias elevadas, capaces de hacer progresar la ciencia en el laboratorio y en el campo de cultivo.

Aconsejo, pues, la lectura de estos pequeños volúmenes á nuestros antiguos alumnos, que encontrarán en ellos la huella de su primera educación agrícola.

También la aconsejo á sus jóvenes compañeros de hoy, que encontrarán en ellos, condensadas en poco espacio, muchas nociones que podrán servirles en sus estudios.

En fin, al gran público agrícola, á los cultivadores, los ofrezco esperanzado. Ellos nos dirán, después de haberlos leído, si, como se ha pretendido alguna vez, la enseñanza superior agronómica excluye todo espíritu práctico. Espero que esta censura, ya gastada, desaparecerá definitivamente. Por otra parte, nunca ha sido acogida por nuestros rivales de Inglaterra y de Alemania, que han desarrollado magníficamente en sus países la enseñanza superior de la agricultura.

Sucesivamente, ofrecemos al lector volúmenes que tratan del suelo y de la manera como debe ser trabajado, de su naturaleza química, del modo de corregirla ó de completarla, de las plantas comestibles ó industriales que se le pueden hacer producir, de los animales que puede alimentar y de los que le perjudican.

Estudiamos las manipulaciones y las transformaciones que la industria hace sufrir á los productos de la tierra: la vinificación, la destilería, la panificación, la fabricación del azúcar, de la manteca, del queso.

Terminamos ocupándonos en las leyes sociales que rigen la propiedad y la explotación de las fincas rústicas.

Tenemos la firme esperanza de que los agricultores acogerán favorablemente la obra que les ofrecemos.

Dr. Pablo Regnard,
Miembro de la Sociedad Nacional de Agricultura de Francia,
Director del Instituto Nacional Agronómico.

PREFACIO

El libro que publicamos hoy con el título de la *Química del suelo* es el complemento indispensable de nuestra *Química vegetal*. Estos dos volúmenes forman un Tratado elemental de Química agrícola, esencialmente destinado á la enseñanza.

Apenas es necesario hacer notar el interés de primer orden que ofrece el estudio del suelo. Es éste quien nutre la planta, quien le proporciona el nitrógeno y ciertos elementos minerales capaces de contribuir á la elaboración de sus tejidos. Por consiguiente, es al suelo á quien el hombre y los animales piden su propia alimentación.

El suelo nos ofrece sus riquezas bajo los más variados aspectos: también todas las ciencias humanas encuentran en su estudio materias para investigar de fecundidad inagotable. Al agrónomo corresponde avalorar los preciosos materiales que cada rama de la ciencia acumula en largos años de labor.

Se comprende, pues, que el que se arriesga á escribir un Tratado de Química agrícola, aun cuando sea elemental como la presente obra, sienta cierta aprensión pensando en la suma de conocimientos que debiera poseer para servir útilmente á la causa de la agricultura y á la de la enseñanza. Pueda esta consideración hacer que el lector sea indulgente, cuando encuentre, en las páginas que siguen, errores ú omisiones.

El químico que se ocupa de agricultura considera el problema del suelo de la manera siguiente: Dada una planta, ¿cuáles son los elementos que toma al suelo, en qué forma le son ofrecidos estos elementos, cuál es su grado de asimila-

bilidad, por qué procedimientos se puede modificar el suelo con objeto de que dé una cosecha determinada?

Inspirándonos en estas ideas, creemos deber adoptar el orden siguiente en la exposición de la historia del suelo.

Después de haber establecido, en un primer capítulo, la naturaleza del suelo y los problemas que suscita el estudio de éste, y de haber observado que el suelo, ante todo, está formado por una infinidad de fragmentos de rocas, buscamos, en el capítulo II, por qué sucesión de fenómenos este polvo mineral, que llamamos tierra de labor, ha podido originarse. Describimos los efectos mecánicos de trituración y de erosión de las rocas macizas que producen los ventisqueros, los torrentes, la acción de las heladas, las raíces de los árboles, el desarrollo de las vegetaciones criptogámicas. Estos efectos mecánicos van acompañados de reacciones químicas de hidratación, de disolución, de oxidación, de carbonatación, que serán tanto más eficaces, respecto de la pulverización y de las metamorfosis ulteriores que sufre la roca inicial, cuanto mayor sea la superficie en que se ejerzan; los fenómenos mecánicos son, pues, los que preparan el campo de acción de los fenómenos químicos. Examinamos luego, como consecuencia de este trabajo preparatorio, las formas principales de los elementos de las rocas que se encuentran en la tierra de labor, insistiendo sobre todo en aquellos elementos que pueden ser de alguna utilidad en la nutrición de las plantas.

El capítulo III comprende un estudio sumario de los gases de la atmósfera, en concepto de agentes químicos destinados á intervenir de un modo incesante en los fenómenos que se efectúan en el suelo.

Definido así el suelo en su formación, examinamos en el capítulo IV su estructura física. Agrupamos los más variados elementos que contiene el suelo en un pequeño número de substancias fundamentales, fáciles de aislar, y buscamos cuáles son los factores que favorecen ó dificultan la circulación del agua y de los gases de la atmósfera en la masa del suelo.

Pasamos luego, en el capítulo V, á exponer las propiedades físicas de la tierra de labor: peso específico, capacidad

para el agua, aptitud para la desecación, relaciones con el calor solar, etc.

Cada elemento de una tierra desempeña un papel físico determinado respecto de la distribución de los flúidos en su espesor. Los efectos recíprocos de estos elementos se suman ó se combaten, según sus proporciones relativas. También es importante poder definir, en cada caso particular, cuál es la cantidad de un elemento que entra en la composición de un suelo dado: éste es el objeto que se propone conseguir el análisis mecánico y físico á que dedicamos el capítulo VI.

El medio sólido cuya superficie modifica constantemente el agricultor con las labores nos es ahora conocido. Hasta aquí, no era más que un sostén inerte. Debemos investigar cuál es su composición íntima, abordar, por consiguiente, el estudio de su estructura química, definir la naturaleza, las formas, la cantidad de las substancias nutritivas que la planta debe encontrar en él. En el capítulo VII nos dedicamos al examen de la constitución química de la materia mineral de los suelos; estudiamos principalmente el modo de obtención, la composición y la riqueza de las disoluciones que contiene normalmente una tierra de labor: porque las raíces no toman probablemente al suelo los elementos fijos que la planta necesita más que cuando éstos adquieren un alto grado de división como el que presenta una substancia salina en disolución en el agua. Los fenómenes de doble descomposición que intervienen en la producción de las materias solubles nos entretendrán algunos instantes, y luego trataremos de definir las diferentes formas de la materia mineral, útiles á la planta, partiendo de la acción de ciertos reactivos enérgicos.

Las substancias minerales, tan numerosas y tan variadas, de que acabamos de tratar en los capítulos precedentes, están siempre íntimamente mezcladas con cantidades variables de materias orgánicas, restos de vegetaciones anteriores. Estas dos suertes de materiales reaccionan entre sí, no solamente desde el punto de vista físico, sino que se compenetran y forman verdaderas combinaciones. El humus, que así se llama generalmente la substancia orgánica de los suelos, es un generador de gas carbónico: él es la fuente principal del

nitrógeno que las plantas absorben después que este nitrógeno ha sufrido ciertas transformaciones indispensables que deben llevarlo al estado difusible. Estas nociones sobre la constitución y el papel de la materia orgánica de los suelos están desarrolladas en el capítulo VIII.

Una buena tierra de labor presenta siempre la notable propiedad de retener, con gran provecho de las plantas que en ella crecen, ciertos elementos minerales que las aguas de riego ó de infiltración no le quitan, mientras que otros elementos, no menos útiles, son fatalmente arrastrados. Esta propiedad especial, conocida con el nombre de *poder absorbente,* depende á la vez de fenómenos químicos y de acciones físicas de superficie. Cuando se conocen los factores principales, es posible modificarla en sentido favorable á la nutrición de la planta. En el capítulo IX está descrito este fenómeno especial.

De la misma manera que hemos debido buscar los medios susceptibles de desempeñar en la tierra de labor un papel físico importante, debemos ahora examinar los procedimientos que permiten determinar las substancias nutritivas que contiene el suelo. Esforcémonos sobre todo en definir la fracción de estos elementos que es actualmente asimilable por la planta, es decir, inmediatamente disponible en una forma apropiada para la absorción. En el capítulo IX expondremos los principales métodos de análisis químico de los suelos.

Hasta ahora hemos considerado al suelo como un medio puramente mineral, como un polvo desprovisto de vida en el cual los únicos cambios que se manifiestan están regidos por las leyes de la mecánica química. Pero, el suelo está poblado de especies microbianas muy variadas. La mayor parte de estos microorganismos ejercen una influencia de primer orden en las transformaciones que sufre la materia orgánica que está tan estrechamente unida con la materia mineral. En las condiciones favorables, estas transformaciones conducen siempre á la simplificación del núcleo orgánico, de tal manera que éste se convierte finalmente en gas carbónico, agua, amoniaco y ácido nítrico. El núcleo orgánico, tal como está contenido en el humus primitivo, sería casi siempre inutili-

zable si no sufriera, de parte de los infinitamente pequeños, profundas metamorfosis que lo mineralizan y le permiten así concurrir activamente á la nutrición vegetal. El suelo, pues, está en continua fermentación, evoluciona, como evolucionaría un organismo viviente: la tierra de labor es un verdadero caldo de cultivo.

Apenas hace cuarenta años que este estudio microbiológico del suelo ha sido emprendido de una manera metódica: pero, los resultados que ha dado ya son de tal importancia, que todo químico que se ocupa en cuestiones agrícolas debe interesarse por ellos. En el capítulo XI exponemos las nociones relativas á las propiedades biológicas del suelo.

Esta vida microbiana repercute de un modo notable en la fertilidad de una tierra: fácil es convencerse de ello mediante un detenido estudio de las aguas de infiltración, al cual dedicamos el capítulo XII.

Existe una infinita variedad de suelos, puesto que existe una infinita variedad de rocas y que la manera como se descomponen, física y químicamente, nunca es la misma en todos los sitios. Es, pues, indispensable, antes de terminar, tratar de establecer una clasificación de los suelos, examinar sus respectivas propiedades con objeto de conocer la naturaleza de las plantas que podrán cultivarse en ellos y los abonos ó enmiendas que será conveniente incorporarles para mejorarlos. La exposición crítica de las diferentes clasificaciones de los suelos está desarrollada en el capítulo XIII, que es el último.

El estudio racional de la tierra de labor comprende, pues, como acabamos de ver, una multitud de problemas de la mayor importancia, problemas que, generalmente, no podrían tratarse por separado y cuya solución, forzoso es confesarlo, es todavía muy incompleta en la mayoría de los casos.

Con la idea de aclarar un poco alguno de los puntos más notables de la Química del suelo es que hemos escrito estas páginas. Consideraremos sobradamente recompensados nuestros esfuerzos si su lectura puede ser de algún provecho á los agricultores, á los químicos que se ocupan de fisiología general, en fin, á todos los que se interesan por la naturaleza.

No hemos creído que, en este libro elemental, fuese indispensable incluir notas bibliográficas, aun cuando se nos haya censurado ya este hueco á propósito de nuestra *Química vegetal*. No hay que decir que hemos debido consultar gran número de memorias publicadas, en su mayor parte, en los periódicos más conocidos sobre la materia. Nos limitaremos á citar aquí el total de algunas obras de las cuales hemos tomado á menudo datos:

Boussingault: *Agronomie, Chimie agricole et Physiologie;* 8 volúmenes, París, 1860-1891. -Schlœsing: *Contribution à l'étude de la Chimie agricole* (*Encyclopédie Frémy*); París, 1885. --Dehérain: *Traité de Chimie agricole;* 3.ª edición, París, 1902.- Wollny: *La décomposition des matières organiques et les formes de l'humus*, traducción de L. Henry, París, 1902. -Hall: *Le sol en agriculture;* traducción de Demolon, París, 1906. Harwey W. Wiley: *Principes and Practice of agricultural analysis;* 2.ª edición, volumen I, Easton, 1906. A. Mayer: *Lehrbuch der Agrikulturchemie;* 5.ª edición, Heidelberg, 1911. E. Ramann: *Bodenkunde;* 3.ª edición, Berlín, 1911. - E. A. Mitscherlich: *Bodenkunde für Land und Forstwirte;* Berlín, 1905. – Löhnis: *Handbuch der landwirtschaftlichen Bakteriologie;* Berlín, 1910.

Al terminar tenemos el gusto de cumplir un deber. Hemos recurrido muchas veces á los consejos y á la ilustrada crítica de nuestro amigo E. Demoussy. Le agradecemos, como se merece, el no haber escatimado tiempo ni trabajo en la revisión meticulosa de las páginas de este pequeño libro.

G. André.

QUÍMICA DEL SUELO

CAPÍTULO PRIMERO

INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DEL CONOCIMIENTO DEL SUELO

Objeto de este estudio.—Aspecto general del suelo.—Heterogeneidad del suelo.—Tierra de labor.—Capas situadas debajo de la tierra de labor.—Cómo se puede estudiar el suelo.—Elementos minerales absorbidos por la planta.

I

ASPECTO GENERAL DEL SUELO

Llamamos *suelo* á esta masa sólida en la que las plantas introducen sus raíces. El suelo sirve de sostén á la planta, que resiste, en general, tanto mejor la acción del viento cuanto más fuertes son sus raíces y cuanto mayor es la profundidad adonde llegan.

Pero el suelo no es un sostén inerte solamente: la planta que crece, ya sea porque su semilla ha sido depositada en tal ó cual sitio por el capricho de la suerte, ya porque ha sido puesta allí intencionadamente, encuentra en este medio sólido elementos que absorbe y que son indispensables para su crecimiento. Estos elementos son el *agua* y *ciertas materias minerales*. Todas las investigaciones hechas desde más de sesenta años respecto de la nutrición vegetal demuestran, en efecto, de la manera más evidente, que un corto número de substancias fijas, siempre las mismas, sirven para la

formación de los tejidos de la planta (1). De suerte que, si se hallara en algún punto una tierra absolutamente desprovista de vegetación, se podría asegurar que faltaban en ella una ó varias de las materias indispensables á la planta; suponiendo, por otra parte, que la temperatura del aire ambiente no sea demasiado baja, ni demasiado elevada, para ser un obstáculo á la vida vegetal.

El suelo es un medio heterogéneo. — Examinemos ahora algo más detenidamente la masa sólida en la que están implantados los vegetales. A simple vista observaremos que esta masa presenta exteriormente muy diversos aspectos. Su *color* es muy variable; á veces es blanco: éste es el que se nota en las tierras que contienen un exceso de calcáreo; con frecuencia es blanco agrisado: así ocurre en los suelos ricos en sílice; en muchos casos es de color rojo más ó menos intenso, con tendencia al pardo: este color caracteriza los suelos ferruginosos; el suelo es de color pardo más ó menos obscuro en la mayor parte de las tierras cultivadas; por último, otras veces es negro, como se puede ver en las tierras turbosas.

Se puede decir que á cada color, por más que diste mucho de ser verdad en absoluto, corresponde una *flora espontánea* diferente; significa esto que, si en todas estas masas sólidas se encuentran los mismos elementos fundamentales propios para la nutrición de la planta, estos elementos no están en las mismas proporciones, y *que la manera como están dispuestos en tal ó cual sitio* conviene á una planta y no á otra.

Una observación superficial nos demuestra también que ciertos suelos contienen elementos más ó menos voluminosos: piedras, guijarros de variadas dimensiones, mientras que otros parecen estar constituídos por elementos mucho más finos. Estas son las nociones muy sumarias que podemos

(1) Si se examina el conjunto de los elementos químicos que se encuentran en los compuestos que constituyen los vegetales, se observa que un número relativamente corto es en realidad el que predomina. Pero esto no quiere decir, en modo alguno, que no se encuentren muchos otros, como dice el autor más adelante. Las plantas que crecen en los escoriales de las minas de zinc son en su mayor parte zincíferas; se ha encontrado arsénico en algunas cenizas vegetales; en plantas que vegetan en terrenos graníticos y otros terrenos primitivos se han hallado indicios de cobre; las cenizas de muchas plantas contienen boro, etc. — DR. C. BRUGUÉS.

adquirir por una simple ojeada al pasar por una extensión cualquiera de terreno. La conclusión que de ello sacamos es, pues, la siguiente: esta porción de nuestro planeta que lleva los vegetales es esencialmente *heterogénea*.

Esta falta de homogeneidad la vamos á encontrar hasta en las menores partes de la masa que acabamos de examinar sumariamente. Tomemos 2 ó 3 kg. de una *tierra* cualquiera y con esta palabra entenderemos desde ahora esta parte de la corteza sólida del globo donde penetran las raíces de una planta, —pongámoslos en un tamiz cuyas mallas tengan, por ejemplo, un centímetro de abertura. Según la naturaleza de la tierra que se ensaya, quedará en el tamiz una cantidad mayor ó menor de piedras. Podemos ver en seguida que éstas tienen formas y colores muy variados. El tamiz retiene también, en muchos casos, fragmentos de substancias amorfas, blandas, en las cuales reconocemos con facilidad restos de vegetales muertos. Tamicemos mediante tamices de mallas cada vez más apretadas la masa de tierra que ha pasado á través del primero, y encontraremos, prescindiendo de las dimensiones, los mismos elementos que el primer tamiz había retenido. Finalmente, acudamos á la lente para examinar lo que deja pasar un tamiz de mallas de medio milímetro. Al lado de fragmentos de materias duras, que á veces presentan formas geométricas, encontraremos una gran cantidad de elementos sin contornos definidos, opacos unos y más ó menos transparentes otros. Entre estos elementos mezclados se hallan esparcidas partículas de materia *orgánica* que con frecuencia es fácil distinguir de los elementos *minerales*.

Todas ó casi todas las tierras que sometamos á este tratamiento nos darán el mismo resultado: solamente variarán las proporciones de estos diversos fragmentos de distinta naturaleza. La tierra está formada, pues, hasta en sus menores elementos, por partículas sin homogeneidad. Este *análisis inmediato* (1) puede efectuarse también de una manera muy sencilla echando en un gran vaso transparente lleno de agua un puñado de tierra. Algunos elementos gruesos caen rápidamente al fondo; otros, de menores dimensiones, tardan más tiempo en recorrer el líquido; otros quedan bastante tiempo en suspensión, por su extremada pequeñez, y otros, por último, sobrenadan, y en su mayor parte están formados por restos vegetales de tamaño variable y en un estado más ó menos adelantado de descomposición. Próximamente tendremos ocasión de ver cómo y por qué la tierra presenta necesariamente esta particular estructura.

(1) Cuando se quiere hacer un análisis detenido de una mezcla debe principiarse por hacer el *análisis inmediato*, que tiene por objeto separar las materias que forman la mezcla, cada una de las cuales podrá ser sometida al análisis elemental en caso de ser compuesta. Así, el análisis de un granito comportará primero la separación del feldespato, el cuarzo y la mica que lo forman; después seguirá el análisis elemental de cada uno de estos tres minerales.—C. B.

¿A qué profundidad penetran las raíces? — Tierra de labor. — ¿A qué profundidad penetran las raíces? Esta profundidad varía mucho, no sólo con la naturaleza de los vegetales, sino también con la constitución del medio sólido en que éstos se hallan. Las raíces de los grandes árboles, y aun á veces las de las plantas anuales, pueden penetrar á una profundidad de muchos metros si no existen obstáculos en la masa del suelo. Cuando, por el contrario, la roca compacta se halla á corta distancia de la superficie, las raíces tropiezan en ella y se extienden en una circunferencia cuyo diámetro será mayor ó menor. Cuando una planta no puede hallar en profundidad los elementos nutritivos que necesita, los busca extendiéndose por los lados. Esto es lo que se observa frecuentemente cuando las raíces de un vegetal encuentran una capa arenosa muy pobre en materias fertilizantes. Se puede, pues, en muchos casos, juzgar la riqueza de un suelo examinando la cantidad de vegetales que se desarrollan en él en una determinada superficie. Las plantas abundarán tanto más y su desarrollo será tanto mayor cuanto más profundo sea el suelo donde toman sus alimentos; estarán tanto más espaciadas y su vegetación será tanto más lánguida cuanto menos profunda sea la capa de tierra. Importa mucho, pues, en agricultura, disponer, cuando es posible, de un suelo profundo, capaz de contener una provisión suficiente de materias apropiadas para suministrar á los vegetales que en él vegetan las substancias indispensables para su existencia. Sin embargo, la fertilidad de una tierra así no podría ser indefinida, salvo en casos excepcionales. Para mantener al mismo nivel su fecundidad, es indispensable *restituirle* los elementos de que ha sido despojado en virtud de las cosechas que sucesivamente de él han sido obtenidas. Es preciso, y esto es de primera importancia, *removerlo* en ciertas épocas para disminuir su compacidad y permitirle almacenar agua y aire. Cuando la masa térrea está bien dividida, la siembra de las semillas es más fácil y se asegura mejor su germinación. Este trabajo mecánico es el de la laya y del arado. ¿A qué profundidad penetra el hierro de estos aperos? Apenas á algunos decímetros, aun cuando se acuda á

los instrumentos más perfeccionados. Se ha convenido en llamar *tierra de labor* la parte de la superficie del globo en que pueden penetrar sin grandes dificultades los aperos de labranza. La altura de esta capa es infinitamente pequeña con relación á la masa total del suelo, y la mayor parte de las raíces se extienden en regiones mucho más hondas que aquellas que nuestros instrumentos de cultivo han removido.

Importancia de la capa situada debajo de la tierra de labor.—Resulta de lo que precede que debemos fijar toda nuestra atención en la capa de tierra accesible á los instrumentos de cultivo: podemos modificar profundamente el estado físico de esta capa, aumentar su permeabilidad con frecuentes labores, enriquecerla con la adición de abonos apropiados, limpiarla con la escarda de malas hierbas que disputan á la planta principal el agua y las materias alimenticias. Pero si nuestros medios de cultivo se limitan á la mejora de una costra muy delgada, no olvidemos que las raíces, como hemos dicho antes, penetran en regiones más bajas para buscar también en ellas el agua y las materias nutritivas. Es, pues, indispensable conocer la naturaleza y las propiedades de estas capas inferiores. La planta, efectivamente, toma con frecuencia de ellas la mayor parte de las substancias que necesita. Estas nociones serán más adelante desarrolladas detalladamente.

II

CÓMO PUEDE ESTUDIARSE EL SUELO

Es fácil comprender, aun sólo después de un examen superficial, que el estudio del suelo abarca tres órdenes de problemas generales.

Los elementos minerales cuya presencia hemos reconocido y cuya variabilidad de formas hemos hecho constar, tienen grados de finura muy diferentes según las tierras. Parece que estos restos minerales, de tamaños tan variados, son los productos de una trituración más ó menos enérgica de masas iniciales mucho más voluminosas. ¿En virtud de qué serie de fenómenos ó de accidentes naturales aparecen estos fragmentos en los suelos, constituyendo sus elementos funda-

mentales? Ante todo, es indispensable estudiar la ***formación mecánica del suelo.***

Basta una ligera ojeada para ver que el resultado de esta formación no es el mismo en todas partes. Este hecho tiene grande importancia cuando se trata de determinar de qué manera se mueven á través de las partículas de los diferentes suelos el agua y el aire, estos dos elementos cuyo papel capital estudiaremos más adelante. ¿Cuál es la acción de las *heladas*, por ejemplo, en las masas minerales impregnadas de agua? ¿Cuál es la *influencia de la vegetación* que se presenta espontáneamente en muchas de estas masas?

El movimiento del agua entre las partículas térreas debe, *a priori*, efectuarse de una manera que no puede ser idéntica en todas las tierras: una tierra almacena mucha agua y la retiene fácilmente; otra se comporta inversamente. En la una, la circulación de los gases es fácil; en la otra, los gases pasan con lentitud. Ciertas tierras conservan el agua que han recibido de la lluvia ó de los riegos; otras la dejan escurrir fácilmente á su través. Una tierra que retiene los líquidos mucho tiempo, que, cuando llega la sequedad, se resquebraja al desecarse y forma masas voluminosas en las cuales los instrumentos de labranza entran con pena, es una tierra cuyo cultivo es difícil y á veces imposible. Recíprocamente, una tierra permeable al agua es una tierra que se divide fácilmente cuando viene la sequedad: los instrumentos de cultivo penetran en ella con facilidad grande. Así, pues, ya que las tierras no se comportan del mismo modo respecto de la circulación del agua y de los gases, forzosamente deben estar constituídas de distinta manera. No siendo idéntico su origen, resulta que su cohesión, su aptitud á la desecación, su permeabilidad, difieren precisamente porque los elementos fundamentales de que están formadas no son los mismos. Se concibe, por consiguiente, que el *primer problema* que se presenta, cuando se estudia el suelo, es el *de su constitución y de sus propiedades físicas*, precedido del de su formación mecánica.

En segundo lugar, dada la diversidad de elementos minerales que contienen los suelos, se puede pensar, *a priori*, que estos elementos se comportarán de un modo muy variable respecto del agua y de los gases de la atmósfera que circulan alrededor de cada una de sus partículas. Es lógico creer que el gas carbónico, el oxígeno, el agua, actúan, según los casos y según la naturaleza de las masas minerales con que están en contacto, ya como simples disolventes, ya como agentes de una descomposición más ó menos profunda. En una palabra, una serie de *reacciones químicas* se engendra á cada momento en el interior del suelo, formándose soluciones de concentración variable con la composición de la masa mineral. Es fácil formarse cargo de lo que ocurre recogiendo algunos litros de agua de *drenage*, esto es, de las aguas que han atravesado cierto espesor de

tierra. Si se evapora esta agua, se encuentra que siempre deja de residuo materias fijas, cuyo peso y composición varían de unas tierras á otras. Los restos orgánicos que contienen la mayoría de las tierras desaparecen parcialmente por la acción del oxígeno atmosférico, en virtud de una oxidación lenta, pero incesante; en cambio, el nitrógeno de estas materias aparece frecuentemente en estas aguas en una nueva forma, en la de ácido nítrico. Estas disoluciones, estas reacciones entre elementos minerales, son de *orden químico*; contribuyen de un modo muy eficaz á la nutrición de la planta, cuyas raíces están bañadas continuamente por estos líquidos. El *segundo problema* que se nos presenta, y cuya gran importancia acabamos de señalar, consistirá, pues, *en el estudio de la constitución y de las **propiedades químicas de los suelos.***

Para comprender la naturaleza del tercer problema hagamos el siguiente experimento: Tomemos un líquido, tal como el que emplean los bacteriólogos, formado por azúcar, una sal amónica y varias otras sales, como fosfatos, sulfatos, etc. Después de haber esterilizado este líquido por el calor, introduzcamos en él una pequeña cantidad de una tierra cualquiera y calentemos á la temperatura de unos 30°. Al cabo de algunos días, á veces ya al cabo de algunas horas, este líquido estará muy turbio. Si examinamos una gota con el microscopio, veremos que está llena de una multitud de muy pequeños organismos. Existe, pues, en el suelo una *flora microscópica* muy variada. En su mayor parte, los individuos que componen esta flora ejercen un papel particular, que ha podido precisarse en algunos casos gracias á pacientes investigaciones emprendidas desde hace unos veinticinco años. De estos microorganismos, el uno es un agente de combustión de la materia orgánica en que vive; el otro es un oxidante del nitrógeno de esta materia orgánica; un tercero transforma el nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal. Todos contribuyen, cada uno según sus aptitudes, á modificar profundamente la estructura de las moléculas tan variadas que constituyen la tierra vegetal. Los fenómenos producidos en el suelo por estos microscópicos agentes, en conjunto son fenómenos químicos, pero de particular naturaleza. Un fenómeno químico propiamente tal procede de una coalición entre dos ó más substancias dotadas de cierto grado de afinidad: contacto del oxígeno con tal ó cual elemento oxidable, seguido de una oxidación ó de una peroxidación de la substancia inicial; contacto del gas carbónico con una materia compleja (por ejemplo, silicatos), seguido de la carbonatación de las bases y de quedar en libertad sílice y diversos silicatos más sencillos. Estos fenómenos son fenómenos puramente químicos, están regidos por las leyes de la mecánica química. La elevación de la temperatura favorece mucho su génesis, y frecuentemente pueden ser obtenidos en el laboratorio con una intensidad y una rapidez que no observamos nunca en la naturaleza. Los fenómenos *biológicos*, por el contrario, que dependen de la presencia y del desarrollo de seres vivos, no pueden efec-

tuarse más que entre los límites de temperaturas compatibles con la xistencia de estos seres. En vista de esto, se podría creer que las ereacciones que provocan no pueden tener más que una débil intensidad. Sin embargo, el número prodigioso de estos seres en la menor parte de tierra vegetal y el inmenso campo de su acción, puesto que pueden actuar sobre las más diminutas partículas, compensan la pequeñez relativa de su acción en un punto determinado. Los fenómenos químicos que están subordinados á la presencia de microorganismos son una consecuencia del modo de nutrición de estos ¡infinitamente pequeños (1).

De lo que antecede se deduce que el *tercer problema* relativo al estudio del suelo es de orden *biológico:* que debemos conocer aquellos de tales microorganismos que trabajan para la solubilización de los elementos del suelo destinados á nutrir la planta, y que debemos combatir aquellos que, por una ú otra causa, dificultan la vida de la misma, ya por producir gases nocivos, ya por formar materias tóxicas. En *resumen*, pues, deberemos estudiar las *propiedades y la constitución biológicas* de los suelos.

Tales son la naturaleza y la extensión de los problemas que lleva consigo el estudio del suelo. Otra cuestión se nos presenta ahora y vamos á tratar de resolverla.

III

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA PLANTA. ELEMENTOS MINERALES ABSORBIDOS POR LA PLANTA

El análisis químico nos enseña que los tejidos de la planta viva contienen siempre los catorce cuerpos simples siguientes: *carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, sodio, calcio, magnesio, silicio, hierro, manganeso, azufre, cloro.*

Estos cuerpos simples existen en estados de combinación muy variados.

La *parte orgánica* del vegetal, esto es, la que desaparece por la incineración, está formada de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Comprende substancias ternarias

(1) Al parecer, en los microorganismos se forman substancias de estructura química complicada, correspondientes al grupo de las enzimas, capaces de actuar de un modo semejante á los catalizadores inorgánicos, determinando transformaciones químicas de masas muy superiores á las suyas.—C. B.

(hidratos de carbono, grasas, esencias, ceras, gomas, etc.) y substancias cuaternarias (albuminoides). La *parte mineral* (1) del vegetal, que queda después de la incineración, contiene los otros diez cuerpos simples. Es evidente que la elevada temperatura necesaria para la destrucción de la parte orgánica modifica profundamente la *disposición molecular* en la misma parte mineral. Sabido es, efectivamente, que los elementos minerales forman en la planta viva compuestos ó asociaciones íntimas con los elementos orgánicos.

El carbono, absorbido por la planta provista de clorofila, procede de la atmósfera, que lo contiene en forma de gas carbónico; el hidrógeno y el oxígeno proceden del agua; el nitrógeno, en ciertos casos, es tomado por el vegetal directamente de la atmósfera en estado gaseoso; en otros casos, que son los más, procede del suelo.

En cuanto á los elementos minerales fijos, la planta debe hallarlos en el suelo en conveniente cantidad. Pero no basta comprobar por el análisis químico la presencia en el suelo de las mismas materias minerales que contiene la planta para afirmar que ésta forzosamente las absorberá y las asimilará luego. En efecto, algunos de estos elementos podrían hallarse en el suelo en grandes cantidades y, sin embargo, no ser de provecho alguno para el vegetal, incapaz de utilizarlos. Aquí entra en juego un factor muy importante. Es preciso conocer ante todo la *forma* en que están en la tierra estos elementos minerales y saber si esta forma es realmente la que reclama la planta. Expliquemos este punto. Cuando se trata de averiguar si una substancia es asimilable por un animal, no hay que considerar únicamente los cuerpos simples que entran en su composición. La gelatina y la urea, por ejemplo, son substancias que contienen ambas carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno; sin embargo, estas substancias no son materias nutritivas. La cuestión del *agrupamiento* de los diversos cuerpos simples interviene aquí y regula la cuestión de la asimilabilidad. Lo mismo ocurre en la planta. En un terreno turboso, que contiene un exceso de nitrógeno, la mayor parte de las plantas superiores, y especialmente las del gran cultivo,

1) Véase lo dicho en la nota de la pág. 1.—C. B.

no podrán prosperar, á pesar de este exceso de nitrógeno; porque la agrupación molecular de que forma parte el nitrógeno orgánico en la turba no es utilizable por los vegetales á que nos referimos. Lo mismo ocurre respecto de ciertas agrupaciones que presentan los elementos minerales: fosfatos en los apatitos, potasa en los granitos, etc. La forma de estos elementos no es apropiada para la nutrición vegetal, sea por efecto de su agrupamiento defectuoso, sea por causa de falta de solubilidad.

El estudio del suelo no debe referirse, pues, únicamente á las nociones relativas á su constitución y á sus propiedades físicas, químicas y biológicas, sino que debe ser completado por el estudio del grado de *asimilabilidad actual* de los elementos que la planta exige. Desarrollaremos más adelante esta materia, dando los pormenores necesarios para su comprensión.

Este asunto de la asimilabilidad es tan importante y ejerce tal influencia en la producción agrícola, que la práctica razonada de los abonos no puede tener otra base. Porque lo que debe guiar al agricultor en el empleo de las materias fertilizantes, no es solamente la riqueza absoluta de estas materias en tal ó cual elemento indispensable para la nutrición vegetal, sino que es sobre todo la facilidad con que la planta las podrá utilizar para la producción de un máximo de cosecha. Las cualidades intrínsecas de un abono deben ser evaluadas según el peso de esta cosecha.

Resulta de lo que acabamos de decir, que un estudio profundo del suelo abarcará especialmente los estados físicos y químicos de los diez elementos fijos, cuya presencia constante en los tejidos de todo vegetal revela el análisis. A estos diez elementos es indispensable añadir el nitrógeno, porque la mayoría de las plantas toma esta substancia de la tierra. Todas las intervenciones mecánicas ó físicas, todas las adiciones de materias extrañas que tengan por objeto modificar cualitativa ó cuantitativamente la naturaleza de estos elementos fundamentales y ponerlos así al alcance de la planta en el estado más favorable para su evolución, aumentarán en gran medida la fertilidad de una tierra.

Resumiremos lo que acaba de exponerse en el presente capítulo de la manera siguiente: Debe estudiarse el suelo, por de pronto, en cuanto á su *formación mecánica:* la estructura de los restos de rocas de muy variable volumen de que está compuesto ejerce una influencia de primer orden en sus demás propiedades. La diseminación y la pulverización de ciertos elementos minerales, aumentando considerablemente las superficies, abren, en efecto, de la manera más eficaz una vía á los fenómenos de disolución por los agentes naturales. El suelo debe ser examinado en seguida desde el punto de vista de su *constitución y de sus propiedades físicas* que nos orientan respecto de su grado de permeabilidad para el agua y para los gases, respecto de la mayor ó menor facilidad con que podrá ser labrado, y aun respecto de la naturaleza de las substancias artificiales que será conveniente á veces incorporarle para modificar en determinado sentido, á lo menos en la capa que se labra, algunas de estas propiedades. El conocimiento de las reacciones químicas que se efectúan en el suelo deriva, naturalmente, del estudio antes hecho de su constitución y de sus propiedades físicas. La química del suelo nos ilustra sobre el grado de solubilidad de los elementos que forman las rocas: nos deja entrever algunos de los fenómenos que engendra la acción concomitante del agua y del gas carbónico sobre las múltiples substancias minerales que componen el suelo; nos suministra algunas indicaciones sobre la naturaleza de la propiedad especial que permite á tal ó cual suelo retener ciertos elementos de fertilidad é impedir su marcha, aun después de largas lociones por el agua de lluvia. Por último, entre las numerosas especies de infinitamente pequeños que viven en el suelo, las hay que provocan reacciones químicas muy especiales. Estas reacciones tienden á solubilizar ciertas materias indispensables al vegetal: por consiguiente, juegan un papel capital por lo que toca á la nutrición de la planta.

CAPITULO II

FORMACIÓN DE LOS SUELOS; ELEMENTOS DE LOS SUELOS

De las rocas en general.—Suelos formados donde se hallan, suelos de transporte.—Constitución de las rocas, su composición.—Fenómenos que determinan la destrucción de las rocas: acciones mecánicas, acciones químicas, acciones fisiológicas.—Modo de destrucción de las rocas principales.—Formas principales de los elementos de las rocas que se hallan en el suelo.—Discusión relativa á la composición de los elementos de las rocas.—Presencia y origen del humus en el suelo.

I

LAS ROCAS EN GENERAL

Qué debe entenderse con la palabra «rocas».—A una profundidad mayor ó menor, con frecuencia aun en la superficie del suelo, se encuentran masas voluminosas, duras, compactas, diversamente coloreadas. Estas masas han recibido el nombre de *rocas*. Se puede definir *una roca* diciendo que es una reunión de partes minerales que permanece homogénea, ó poco menos, en una extensión más ó menos considerable. En latitudes muy diferentes se encuentran las mismas rocas. Los minerales que las constituyen representan muy frecuentemente especies químicas bien definidas; pero, una roca no es precisamente una especie química, es una mezcla, con frecuencia en cualquier proporción, de elementos cristalinos y elementos amorfos cuya homogeneidad es á veces bastante grande. Una roca está esencialmente carac-

terizada por los minerales que entran en su composición. Una roca maciza puede no contener más que una sola especie mineral pura; sin embargo, el hecho es bastante raro, y las rocas más reputadas como puras contienen siempre algunos elementos extraños, con frecuencia, es verdad, en pequeñas cantidades. En su mayor parte las rocas están compuestas de dos ó más especies minerales, pero su número no es, en conjunto, muy grande nunca. La expresión de *roca* no implica forzosamente la idea de que se trata de una masa dura y resistente; existen, en efecto, rocas que son bastante poco coherentes (algunas rocas calcáreas). Si entendemos con la palabra *rocas* una masa homogénea de alguna extensión, deberemos calificar de *rocas* ciertas masas arenosas; el agua misma, á pesar de su estado líquido, puede pasar por una roca; los depósitos de materia orgánica conocidos con el nombre de *turberas* son igualmente rocas.

Rocas cristalinas, rocas sedimentarias. — Se pueden clasificar las rocas en dos grandes categorías: 1.º, las *rocas cristalinas*, formadas esencialmente por minerales silicatados; 2.º, las *rocas sedimentarias*, que proceden de la acción de las aguas sobre las primeras y que, sobre todo, están formadas por capas superpuestas unas á otras.

Las rocas cristalinas, á su vez, deben dividirse en: α. *Rocas macizas ó eruptivas*; β. *Rocas cristalinas estratificadas ó cristalofilinas*.

α. Rocas macizas ó eruptivas. — Estas rocas parecen compuestas de una materia uniforme cuya masa no está interrumpida más que por grietas de variable anchura. Penetran en lo profundo; parece que proceden de la solidificación de una substancia primitivamente líquida, como las lavas, venida del interior de la tierra; de ahí el nombre de *rocas eruptivas*.

β. Rocas cristalinas estratificadas ó cristalofilinas. — Estas rocas están formadas de elementos cristalizados, por lo general dispuestos en capas; de aquí la denominación de

esquistos cristalinos que algunas veces se les aplica (*gneis, micasquistos*).

Rocas sedimentarias.— Tienen su origen en el trabajo de las aguas; se llaman también *rocas de origen externo*, reservando el nombre de *rocas de origen interno* á las rocas eruptivas que derivan de un trabajo interno de la masa del globo terrestre.

La formación de las rocas sedimentarias reconoce un triple origen: *químico, orgánico* y *detrítico*. El origen *químico* es el resultado de una precipitación de substancias contenidas en las aguas (carbonatos, sulfatos). El origen *orgánico* debe ser buscado en la acumulación de esqueletos animales ó vegetales, cuyos elementos han sido tomados al medio ambiente (los fosfatos y los carbonatos formaron parte de algas, de foraminíferos, de equinodermos, de briozoarios, etc.). El origen *detrítico* debe buscarse en los materiales modificados tomados de rocas preexistentes, cristalinas ó sedimentarias.

La formación de las rocas sedimentarias resulta, pues, en parte, de la disgregación de las rocas cristalinas, cuyo estudio forzosamente debe ser el primero.

Por último, un gran número de rocas sedimentarias han sufrido, después de su formación, modificaciones que han afectado su estructura, su composición química, la naturaleza de los minerales de que primitivamente estaban formadas; estas rocas se llaman *metamórficas*. Los cambios así efectuados en la roca primitiva son únicamente locales; resultan de la acción de gases, de vapores, de aguas minerales que han filtrado á través de la roca inicial.

Suelos formados donde se hallan; suelos de transporte. — El examen, aun sumario, de las rocas en general, enseña que existen dos especies de suelos: *los formados donde se hallan* y *los suelos de transporte ó acarreo*.

En los primeros, si se examina la roca que se encuentra á cierta profundidad debajo de su superficie, se halla una masa dura, compacta, agrietada á veces de un modo más ó menos irregular, pero generalmente poco alterada y formada con frecuencia por grandes bloques. Á menor profundidad, la roca ya presenta rendijas más numerosas y los bloques circunscritos por ellas son menos voluminosos. Á medida que nos acercamos á la superficie de la roca, las

grietas ó rendijas aumentan cada vez más; las raíces de las plantas frecuentemente han entrado en las mismas y han producido múltiples hendiduras. Por último, en la superficie misma de la roca se observa una reunión de fragmentos, que muchas veces son de poco volumen, bastante quebradizos para reducirse á trozos todavía más pequeños cuando se les somete á débiles acciones mecánicas. Encima de estos restos, cuya forma y composición sobre todo recuerdan aún muy bien la roca inicial, se encuentra á una altura variable lo que hemos llamado *tierra de labor*, esto es, un conjunto complejo de fragmentos todavía más pequeños de esta roca, cuya pequeñez y estado de disgregación van acentuándose á medida que nos acercamos á la superficie del suelo. Aquí estamos realmente en presencia de un suelo *formado donde se halla:* la composición mineral de la capa de tierra de labor, su estructura, sus propiedades, son las que se encuentran en la roca maciza que le sirve de base. Si esta roca es rica en tal elemento indispensable para la vida de la planta, la capa de tierra de labor contendrá este elemento en cantidad suficiente para subvenir á las necesidades de numerosas cosechas. Recíprocamente, si la roca es pobre ó si está desprovista de este elemento de fertilidad, la tierra de labor lo contendrá también en pequeña cantidad ó estará faltada de él: será absolutamente necesario suministrar á la planta este elemento en forma de abono.

¿Por qué influencias se ha producido esta división de la roca compacta cuyos restos forman la tierra de labor? A continuación, como causas primeras de esta disgregación progresiva, vamos á poner de manifiesto la intervención de acciones mecánicas, de acciones químicas (disoluciones, ataques por el agua y el gas carbónico) y acciones microbianas.

Acabamos de estudiar la formación de un suelo que está directamente en contacto con la roca maciza sobre que descansa y que tiene la misma composición, poco más ó menos, que esta roca. Decimos *poco más ó menos* porque es evidente, *a priori*, que, sobre los elementos más finos que se encuentran en la superficie, la acción de los agentes atmosféricos debe ejercerse con una energía incomparablemente mayor que sobre los grandes fragmentos subyacentes. De manera que los fenómenos de oxidación, de hidratación, de carbonatación, deberán ocasionar reacciones químicas de tal naturaleza, que la composición de la tierra fina se apartará más ó menos de la de la roca maciza. Pero, en todos los casos, se encuentran los mismos elementos en la tierra fina que en las masas más densas de la roca situada debajo de ella.

Sin embargo, puede ocurrir que el examen de un suelo dé resultado muy diferente. La masa dura que hemos encontrado antes á cierta distancia de la superficie y que, á veces, sobresale de esta superficie, no se presenta. Podemos hacer profundos agujeros sin ser detenidos por ningún obstáculo y, cuando éste aparece, observamos

que su estructura y su composición son notablemente distintas de las del medio superior. En otros términos, no existen ya las mismas relaciones que acabamos de fijar entre la roca dura y los restos más finos que le están superpuestos. Parece, pues, que la capa de elementos finos que cubre la roca procede de otra región y que se ha formado por destrucción de rocas extrañas á la región donde hallamos actualmente sus restos. En los terrenos que vienen de lejos, y calificados de *terrenos de transporte*, encontramos elementos de tamaños sumamente distintos; desde el de grandes guijarros hasta el de los granos de la arcilla más tenue. El agua es quien ha arrastrado, á veces á grandes distancias, los restos de rocas muy heterogéneas cuyos depósitos guardan relación con la velocidad de la corriente líquida que los ha llevado consigo: los elementos finos se depositan cuando la velocidad del agua es escasa, los elementos mayores se detienen á una distancia de la roca inicial tanto menor cuanto más voluminosos son. Sabiendo estas nociones, se ve que es indispensable conocer cuáles son los elementos constitutivos de estas rocas, cuya composición tiene una influencia capital sobre la estructura y las cualidades de la tierra de labor.

II

CONSTITUCIÓN DE LAS ROCAS

Generalidades. — Las rocas que hemos llamado *eruptivas* proceden de la consolidación de una substancia primitivamente líquida. Forman en la superficie del globo una costra cuyo espesor es difícil de determinar. Esta formación por enfriamiento se observa con frecuencia, aun en nuestros días, cuando las masas de lavas incandescentes lanzadas por los cráteres de los volcanes se escurren por las paredes del volcán. Paulatinamente, estas masas, después de haber recorrido cierto trayecto en estado líquido, se vuelven más y más pastosas y finalmente adquieren el estado sólido.

Los elementos químicos esenciales que caracterizan estas rocas, cuya estabilidad y dureza constituyen los caracteres dominantes, son los *silicatos*. Éstos están representados por la unión de la sílice con un corto número de bases: alúmina, potasa, sosa, cal, magnesia, óxidos ferroso y férrico, para no citar más que las más importantes. Muchas rocas admiten,

además, en su constitución, cierta cantidad de sílice en estado de libertad. Las rocas presentan una gran variedad respecto de la *proporción variable* de los silicatos que entran en su estructura. Además, entre dos rocas que parecen ser casi idénticas pueden existir diferencias de estructura y de composición, debidas á la substitución parcial de una base por otra.

La importancia de la sílice, en particular, es considerable; esta materia es la dominante en la composición de la corteza terrestre.

Se han dado las cifras siguientes como representando la composición media de la costra sólida. Esta composición resulta del análisis de gran número de rocas de diversos países:

SiO^2	=	58,2	por 100
Al^2O^3	=	15,8	»
Fe^2O^3	=	3,3	»
FeO	=	3,8	»
MgO	=	3,8	»
CaO	=	5,2	»
Na^2O	=	3,9	»
K^2O	=	3,2	»
H^2O	=	1,5	»
TiO^2	=	1,0	»
		99,7	»

Clasificación de las rocas desde el punto de vista químico. — Las rocas, desde este punto de vista, han sido clasificadas según su riqueza en sílice. Unas se llaman *rocas ácidas*, y en ellas se encuentra una proporción de sílice superior á 65 por 100, porque al lado de silicatos químicamente definidos contienen sílice libre. Los elementos de estas rocas son sobre todo: sílice, alúmina y potasa. Las demás rocas son llamadas *rocas pesadas* ó *básicas*: su proporción de sílice es generalmente inferior á 54 por 100; no contienen sílice libre y, entre las bases de los silicatos que las constituyen, se encuentran sobre todo la cal, la magnesia y el óxido de hierro, junto con proporciones variables de potasa y sosa.

Por último, muchas rocas, después de su formación, se

han modificado por *metamorfismo:* lo que significa que estas rocas han experimentado, ya sea en su estructura, ya sea en su composición química, cambios más ó menos profundos. Entre los agentes del metamorfismo debe citarse en primer término la temperatura. Este agente físico ha ejercido su acción sobre ciertas rocas cuando éstas han sido atravesadas por rocas en estado de fusión ígnea (creta transformada en mármol cristalino en contacto de filones de basalto). A veces se trata de *metamorfismo químico* (silicificación de esquistos arcillosos en contacto con el granito): á veces de un *metamorfismo mecánico*, que ha determinado la cristalización de ciertas rocas por la influencia de presiones considerables, tales como las que han podido originarse en las dislocaciones de la corteza terrestre.

Las hendiduras que frecuentemente dividen la masa de ciertas rocas, á menudo están ocupadas por especies minerales no silicatadas (*yacimientos minerales*), de las cuales citaremos las más importantes en cuanto se refieren á la química de la tierra de labor.

Estos yacimientos minerales contienen: *óxidos* (alúmina anhidra é hidratada, aluminatos de hierro y de magnesio, óxido de titano), *nitratos, boratos, carbonatos,* aragonito ó carbonato cálcico ortorrómbico; calcita ó carbonato romboédrico; carbonatos de bario y de estroncio; carbonato doble de calcio y magnesia ó dolomía; carbonato magnésico ó giobertita, *sulfatos* anhidros ó hidratados (yeso ó sulfato cálcico bihidratado, clinorrómbico, anhidrita ó sulfato anhidro, ortorrómbico), *fosfatos* (fosfato tricálcico ó apatito, fosfato de aluminio ó ambligonita), *cloruros* (sal gema), *fluoruros* (fluoruro cálcico ó fluorina, fluoruro doble de aluminio y sodio ó criolita), etcétera, etc.

Se pueden también clasificar las rocas según su estructura, admitiéndose entonces las principales secciones siguientes: *estructura compacta*, cuando los elementos extremadamente finos están muy aproximados unos á otros; *estructura sacaroide*, cuando los elementos presentan una textura cristalina semejante á la del azúcar: *estructura granujienta*, cuando se distinguen en la roca granos más ó menos voluminosos; *estructura esquistosa*, cuando la roca presenta hendiduras de determinada dirección. Si la división de la roca se efectúa en hojas más ó menos delgadas, se dice que la estructura es *hojosa* ó *foliácea:* es *tabular* si las hojas son de algún espesor; es *romboidal* cuando la fragmentación de la roca da masas de forma geométrica más ó menos regular. Se dice que la estructura es *vítrea* cuando la roca se quiebra como el vidrio y tiene su consistencia y fragilidad.

Pero, desde nuestro punto de vista especial, no hemos de hacer la descripción de las rocas; nos hemos de preocupar tan sólo de la *naturaleza de sus elementos*, esto es, de la composición de los minerales que forman su masa. Algunos de estos minerales nos interesan particularmente, porque sus restos constituyen la tierra de labor y porque, entre estos restos, hay un gran número cuyos productos de descomposición por los agentes químicos son substancias nutritivas para los vegetales.

Pasaremos, pues, brevemente revista de los *principales minerales* que se hallan en las rocas más comunes é indicaremos su composición. Pero antes indiquemos á grandes rasgos el modo de proceder para llegar á aislar las especies minerales que las rocas contienen; estos procedimientos se conocen con el nombre de *análisis mineralógico*.

Análisis mineralógico. — Los procedimientos que emplea el análisis mineralógico tienden á aislar las especies minerales que contienen las rocas en estado de mezcla. El examen á simple vista, y mejor con ayuda de la lente, con frecuencia permite reconocer en las rocas gruesos granos de especies bien definidas que pueden separarse de la masa, rompiendo ésta con un martillo ó valiéndose de un buril. En seguida se verá la forma cristalina, la dureza de los fragmentos así aislados, sobre los cuales se podrán hacer actuar algunos reactivos (por ejemplo, ácidos). Un ensayo al soplete proporciona frecuentemente datos muy útiles sobre la naturaleza de los cuerpos simples que entran en la constitución del fragmento.

La *separación mecánica* de los elementos constituyentes de una roca, puede efectuarse, después de la fragmentación de la misma, usando ciertos líquidos (1) cuya densidad es intermedia entre la de los minerales que componen la roca: unos caen al fondo del líquido, otros sobrenadan. El empleo del imán presta también grandes servicios para la separación de muchos elementos ferruginosos. En los

(1) Para el *análisis mecánico* de las rocas pulverizadas se emplean diferentes líquidos, por ejemplo soluciones de yoduro mercúrico potásico, que puede llegar á la densidad de 3,196. Se puede emplear tambien el yoduro de metileno, cuya densidad es 3,311; para obtener líquidos de menor densidad, se diluye con benzol.—C. B.

minerales que contienen una notable proporción de hierro, el empleo gradual de un electroimán de potencia variable frecuentemente es muy cómodo. Pero el mejor procedimiento de examen de las rocas consiste en cortar éstas en placas extremadamente delgadas que se observan, no simplemente con el microscopio, porque los colores de los minerales palidecen hasta el punto que no se ve más que una masa incolora, sino valiéndose de la luz polarizada (luz paralela). La lámina delgada se examina entre dos nicoles cruzados: las especies minerales toman colores bastante vivos, característicos con frecuencia, que permiten distinguir unas de otras. Este examen microscópico de las rocas, sobre el cual no podemos extendernos aquí, ha sido especialmente aplicado en Francia por Fouqué y Michel-Lévy.

Es evidente que el *análisis químico completo* de una roca se impone siempre: este análisis es el único capaz de poner de manifiesto las verdaderas proporciones de los distintos cuerpos simples que entran en su composición.

III

PRINCIPALES MINERALES QUE SE ENCUENTRAN EN LAS ROCAS MÁS COMUNES. COMPOSICIÓN DE ESTOS MINERALES

No hay que perder de vista que *sólo un corto número de elementos fijos* nos interesa especialmente, ya porque se hallan siempre estos elementos en las cenizas de las plantas y que se les puede asignar, aunque con grandes reservas todavía, un papel determinado en el proceso de la nutrición, ya porque algunos de estos elementos desempeñan un papel físico ó mecánico importante en la constitución de lo que hemos llamado *tierra de labor*. Este papel será explicado más adelante. En una palabra, debemos conceder particular atención á toda roca ó á todo fragmento mineral que contenga uno ó varios de los siguientes elementos que ordenamos así: 1.º *elementos ácidos*: sílice SiO^2, ácido sulfúrico SO^4H^2, ácido fosfórico PO^4H^3, anhídrido carbónico CO^2, cloro Cl; *elementos básicos*: potasa K^2O, sosa Na^2O, cal CaO, magnesia MgO, alúmina Al^2O^3, óxido ferroso FeO, óxido férrico Fe^2O^3, óxido de manganeso MnO. Pero, no debe olvidarse que el

análisis á menudo descubre en las cenizas de las plantas la presencia de indicios de cuerpos que no se mencionan en la lista precedente: ácido titánico, zinc, flúor, yodo, ácido bórico, cobre, cesio, rubidio, etc. Es probable, sin que pueda afirmarse con seguridad actualmente, que algunos de estos cuerpos desempeñan un papel fisiológico especial, todavía muy obscuro. Sin embargo, con objeto de simplificar aquí el estudio, ya bastante complicado, de la tierra de labor, nos limitaremos á examinar sólo los elementos que hemos dividido en *elementos ácidos* y *elementos básicos*.

A.—Descripción sumaria de algunas rocas eruptivas

α. **Granito en general**. —Esta roca pertenece al grupo de las *rocas ácidas;* está formada por una mezcla de cristales de *cuarzo* (SiO^2), de *feldespatos* y de *micas* (biotita) (1). El cuarzo se presenta con contornos irregulares; es de color blanco, agrisado, á veces rojo ó azulado. La ortosa, blanca, gris ó rosada, á menudo va acompañada de oligoclasa. Las láminas brillantes de mica, elásticas, son blancas ó negras. Al lado de estos elementos fundamentales, se encuentran en los granitos elementos accesorios: hierro oligisto (Fe^2O^3), *hornblenda* (silicato de magnesio y calcio, con alúmina y hierro). La estructura de los granitos es granujienta: se dividen en granitos de granos gruesos, medianos y finos. Muy esparcido en diversas regiones de Francia, el granito se halla igualmente en muchos puntos del globo; es una de las rocas más comunes.

Los *feldespatos*, desde el punto de vista de su composición, constituyen un grupo muy homogéneo. Son silicatos dobles de aluminio y de álcalis (K_2O,Na_2O), ó de tierras alcalinas (CaO). La relación del oxígeno de la alúmina al de las otras bases es siempre 3 : 1. Los feldespatos representan *polisilicatos* en los cuales el número de moléculas de sílice va aumentando continuamente de una unidad. Si se toma por unidad el átomo de oxígeno de la base alcalina ó térrea, el número de átomos de oxígeno de la sílice es el siguiente en los diversos feldespatos: anortita, 4; labradorita, 6; andesina, 8; oligoclasa, 10; albita, 12; ortosa, 12.

Las *micas* se caracterizan por la facilidad con que pueden dividirse en láminas muy delgadas y flexibles, por sencilla exfoliación. Cristalizan, con frecuencia, en prismas ortorrómbicos. Respecto de su constitución, puede decirse que son silicatos de aluminio y de metales alcalinos ó de magnesio. Las *micas magnésicas* tienen por fórmula

(1) Algunas páginas más adelante indicamos la composición química de las especies mineralógicas que aquí sólo mencionamos.

$2 RO . SiO^2$ ($R = Mg, K^2, Al^{2}/_{3}$): las *micas ferromagnésicas*, menos ricas que las primeras en magnesia, contienen óxido ferroso. Existen *micas potásicas* y *micas litíferas*. Las micas son compuestos de tres substancias distintas: un silicato de aluminio y potasio, en el cual el potasio puede estar parcialmente substituído por el sodio ó por el hidrógeno (formando agua con el oxígeno); un silicato magnésico, en el cual el magnesio puede estar substituído por el hierro ó el manganeso; por último, un compuesto fluorado.

β. La **granulita,** algunas de cuyas variedades se presentan finamente cristalizadas, no difiere del granito más que por contener mica blanca (muscovita) en substitución de la biotita.

La *descomposición* del granito, que examinaremos ulteriormente con más detalles, suministra sobre todo un silicato hidratado de aluminio (arcilla), más ó menos puro, así como sales de potasio, de sodio, de magnesio, de calcio (los dos últimos en proporción muy escasa). Ciertos granitos contienen también pequeñas cantidades de *apatito* (fosfato tricálcico cristalizado).

γ. **Pórfiro cuarcífero.**—Esta roca se acerca por su composición á la precedente; su color generalmente es gris. Está formada por ortosa compacta cuyos elementos pueden ser invisibles (pedrosílex; eurita). Con frecuencia, á los cristales de feldespato se unen cristales de cuarzo, á veces de hornblenda, de mica negra, de clorita, de apatito.

δ. **Sienita**.—Esta roca contiene, como elementos fundamentales, ortosa, oligoclasa, hornblenda, biotita, augita. Es un granito desprovisto de cuarzo. Se encuentran en ella, como elementos accesorios, calcita, apatito, oligisto, pirita. Cuando el feldespato ortosa disminuye en su estructura, las sienitas reciben el nombre de *pórfiros sieníticos*.

ε. **Diorita**.—Es una roca granitoide, de estructura granujienta, negruzca ó verde obscura, ó blanca con manchas negras, formada de oligoclasa (algunas veces de anortita ó de andesina), de biotita y de hornblenda. Existen dioritas de ortosa. Esta roca admite, como elementos accesorios, el cuarzo, el piroxeno, etc., y, como productos de alteración, la epidota, la pirita cúbica (FeS^2), el calcáreo (á veces abundante). El apatito es más raro.

B.—Descripción sumaria de algunas rocas volcánicas

α. **Traquitas**.—Son rocas volcánicas, de estructura sacaroide ó porfiroide, formadas por granos muy finos, que dejan huecos entre sí. Cierta cantidad de materias amorfas puede coexistir al lado de la

masa cristalina. Los elementos esenciales de esta roca son los feldespatos, á los cuales se unen, ya anfíboles, ya una mica magnésica, ya la augita. Ciertas traquitas contienen elementos ferromagnésicos en gran abundancia; en otras, se encuentran apatito y magnetita.

β. **Andesitas.**—Rocas porosas, frecuentemente granitoides, formadas por feldespato vítreo (andesina), conteniendo como minerales accesorios hornblenda, augita, biotita, magnetita, apatito. La *obsidiana ó vidrio de los volcanes* es un tipo vítreo de traquita.

γ. **Basaltos.**—Son masas eruptivas, de estructura porfiroide, que han sido masas líquidas como las lavas, formadas por elementos cristalinos, como la labradorita, la augita, la peridota, la magnetita, el piroxeno, en el seno de una masa vítrea esparcida entre los cristales. Los basaltos contienen, como elementos accidentales, carbonatos de hierro y de calcio, pirita, silicatos zeolíticos. Algunas muestras contienen hierro nativo.

δ. **Lavas actuales.**—Son rocas fundidas, de composición muy variable: unas veces ácidas y otras básicas. En el momento en que emergen, pueden tener una temperatura de 1000°. Contienen generalmente silicatos más ó menos básicos y son ricas en elementos de fertilidad, gracias á contener de ordinario fosfatos.

C.—Descripción sumaria de algunas rocas cristalofilinas

α. **Gneis.**—Roca de estructura esquistosa, enteramente cristalina, formada por los mismos elementos que el granito, con el cual se confunde á veces por transiciones insensibles. Su estructura procede del paralelismo de las láminas de mica, que alternan con los cristales de feldespatos mezclados con los de cuarzo. Los gneis contienen algo de apatito y de magnetita (Fe^3O^4); el cuarzo va mezclado con biotita. Ciertos gneis son ricos en anfíbol. Un gneis de composición media contiene, además de la sílice y la alúmina, de 2 á 3 por 100 de las siguientes bases: K_2O, Na_2O, CaO.

β. **Micasquisto.**—Esta roca está compuesta de cuarzo y mica; la última (generalmente biotita) forma la tercera parte y con frecuencia la mitad del conjunto. A veces el cuarzo domina de tal modo que esta roca recibe el nombre de *cuarzo esquistoso micáceo;* otras veces, por el contrario, la mica forma casi la totalidad de la masa. Cuanto más predomina el cuarzo, más susceptible es la masa de dividirse en hojas. Los micasquistos se confunden con el gneis cuando contienen grandes proporciones de feldespatos. Se encuentran en

ellos, como elementos accesorios, grafito, calcita (CO^3Ca), andalusita, disteno, granate, turmalina.

Los micasquistos abundan en muchos puntos del globo.

D.—Rocas sedimentarias

α. **Gres.**—Los gres son rocas silíceas formadas por arena cuyos granos están aglutinados con un cemento de composición variable, pudiendo ser ésta la misma que la de los granos de arena. Los gres son *cuarzosos* cuando sus elementos están formados por granos de cuarzo unidos por un cemento silíceo. En los gres *ferruginosos*, el cemento es el óxido de hierro; en los gres *calcaríferos*, el cemento es el carbonato de calcio; en las demás variedades de gres, el cemento es á la vez calcáreo y arcilloso (esto es, margoso). Los gres *rojos* de granos gruesos contienen, como substancia aglutinante, un cemento arcilloferruginoso.

Las *cuarcitas* son gres silíceos cuyos granos se han soldado unos á otros.

Cuando los gres silíceos de elementos calcáreos han sufrido la acción del agua, pierden todo ó parte de su carbonato cálcico y se forman en ellos cavidades (*grauwackes*).

β. **Rocas arcillosas.**—Las arcillas están constituídas teóricamente por un silicato de aluminio hidratado, pero siempre contienen restos arenosos, mezcla de cuarzo, mica, óxido de hierro, y con frecuencia calcáreo. La variedad más pura recibe el nombre de *caolín* $Al^2O^3, 2SiO^2, 2H^2O$. Las arcillas pueden ser compactas, sin señales de estratificación, ó, por el contrario, pueden presentar alineaciones; se dice, en este último caso, que las arcillas son *esquistosas*. Su grado de dureza y su alterabilidad por los agentes atmosféricos son muy variables.

Una arcilla que contenga más de 15 á 20 por 100 de calcáreo recibe el nombre de *marga*. Entre las diferentes especies de arcilla conviene señalar: el *caolín*, que acabamos de mencionar, en masas blancas ó rojizas; la *arcilla plástica ó grasa*, más rica en sílice que el caolín, de color muy variado: gris, rojo, amarillo, verde, azul. Esta arcilla absorbe bien el agua; forma con este líquido una pasta flexible, á la que se puede dar la forma que se quiera, es untuosa y suave al tacto. La *greda* y la *tierra de alfareros* están formadas esencialmente por arcilla plástica. Una variedad de arcilla, llamada *arcilla esméctica*, usada por la propiedad que tiene de absorber las grasas, presenta la particularidad de desleírse mal en el agua y de ser más fusible que las demás arcillas.

γ. **Rocas calcáreas.**—Están formadas principalmente por carbonato cálcico. Esta sal, cuando es pura, cristaliza en romboedros

(calcita, espato de Islandia) ó en prismas ortorrómbicos (aragonito). El calcáreo en masa puede ser cristalino; entonces va mezclado á menudo con materias esquistosas. El calcáreo *sacaroide* comprende en sus numerosas variedades el mármol blanco; frecuentemente contiene mica, talco, magnetita, granate, piroxeno, apatito, etc. En el *calcáreo compacto*, los granos son extremadamente finos y no pueden ser vistos más que con grandes aumentos. Esta variedad de calcáreo, á veces porosa, va mezclada con óxido de hierro, materias arenosas ó bituminosas, substancias orgánicas y especies minerales cristalizadas muy variables. Su fractura es mate y su color amarillo. Los *travertinos* son calcáreos compactos, blancoagrisados, llenos de cavidades procedentes del desprendimiento de gas carbónico puesto en libertad en el momento en que se depositó el calcáreo. Las *tobas calcáreas* presentan cavidades todavía mayores.

Los *calcáreos arcillosos,* mezclados con una cantidad más ó menos considerable de arcilla, corresponden, según las proporciones de esta última, á los *calcáreos hidráulicos* ó á las *margas propiamente dichas*. Los calcáreos pueden contener á veces una fuerte dosis de sílice [hasta 45 por 100] (*calcáreos silíceos)* ó de óxido férrico (*calcáreos ferríferos)* En el *calcáreo grueso*, los granos están cementados por una materia arcillosa Los *calcáreos térreos* (creta, blanco de Meudon, blanco de España) son blancos, deleznables, de fractura mate. Están formados por granos cristalinos extremadamente finos y, sobre todo, por una infinidad de caparazones de foraminíferos.

δ. **Rocas dolomíticas**.—Están formadas esencialmente por un carbonato doble de magnesio y de calcio romboédrico, isomorfo con la calcita. Incoloras con frecuencia, las rocas dolomíticas tienen á veces color rojo, amarillo, verde ó pardo. La dolomía contiene á menudo, como minerales accesorios, cuarzo, talco, mica, apatito, pirita, oligisto, magnetita. Ciertos calcáreos contienen una notable proporción de magnesia (calcáreos *magnésicos*).

Las dolomías, generalmente compactas y parecidas al calcáreo del mismo nombre, pueden tener, sin embargo, una estructura cavernosa. La *dolomía granujienta* recuerda el calcáreo sacaroide. Puede tener también un aspecto esquistoso. Su carácter esencial es el de disolverse lentamente en el ácido nítrico y sin efervescencia aparente; pero, si se pulveriza y se opera en caliente, se disuelve con rapidez.

ε. **Yeso.**—Es *sulfato cálcico hidratado* $CaSO^4.2H^2O$, cristalizable en prismas clinorrómbicos. El yeso admite á menudo, como elementos accesorios, arcilla, calcita, cuarzo. Los elementos arenosos, que con frecuencia están íntimamente mezclados con él, no alteran su forma cristalina. Los yesos pueden proceder del calcáreo por metamorfismo: llegando emanaciones sulfurosas á ponerse en contacto con éste han expulsado el gas carbónico.

El yeso afecta el estado *laminar* de brillo nacarado, el estado *fibroso* de brillo de seda; el *yeso sacaroide* se parece al mármol, pero es mucho más blando.

ξ. **Apatito.**—Es un fluofosfato cálcico: el flúor puede ser substituído por el cloro ó el yodo. El apatito cristaliza en el sistema hexagonal. Generalmente es incoloro, pero puede ser verde, amarillo ó azul. Se halla en las rocas eruptivas; muchas rocas basálticas y ciertas lavas contienen notables proporciones de fosfato tricálcico, el cual abunda en algunas cretas, donde forma glóbulos concrecionados.

Resumimos en los cuadros adjuntos la composición de algunas rocas comunes é indicamos luego la nomenclatura de los principales minerales que en ellas se hallan. Esta sumaria exposición está destinada solamente á mostrar el grado de riqueza de estas rocas desde el punto de vista de la nutrición de la planta. Se encontrarán, especialmente en la obra de Rosenbusch (*Elemteller Geisteinslehre;* 3 Auflage, Stuttgart, 1911), análisis muy detallados sobre este tema.

Composición centesimal de algunas rocas

Nombres de las rocas		SiO^2	Al^2O^3	Fe^2O^3	FeO	MgO	CaO	Na^2O	K^2O	P^2O^5	H^2O	MnO
Granitos	G. de Flamanville (sin inclusiones)	67,5	14,5	4,6	2,6	1.2	1.8	4,3	3,0		0,5	
	G. rico en inclusiones	67.3	15,3	4,8	2,6	1.5	2,0	3,9	2.2		0,5	
	G. del Colorado	74,4	14,4	0.2	0.9	0,07	0,58	1,7	6,5	0.2		
	G. del ducado de Baden	76,5	12,7	0,2	0.6	0,14	0,46	3,38	4,85			0,47
	Granulita de Suecia	75.4	11,0	2,3	0,9	0.25	1,24	2.72	4,98			
Pórfiros	P. del Lago Mayor	75,0	13,1	1,6	3,0	0.38	1,8	0,92	2.58		1,57	
	P. del ducado de Baden	78,0	12,0	0,23	0.60	0.04	0,62	0,24	6,83		1,41	
	P. del Colorado	68,1	15,0	2,7	1.1	1,1	3.04	3.46	2,93	0,16		
Dioritas	D. del Parque Nacional	63,7	16,0	2,2	1,96	2,43	4,55	3.98	2,84	0,25		
	D. de Silesia	65,8	14,8	1,7	3,1	2.9	4,6	2,1	4.2			
	D. de Alasca	58,6	16,2	1,91	4,2	4,2	6,6	3,5	2,1	0,2		
Sienitas	S. de la Guayana Inglesa	62.9	20,8	1,7	0,4	2.6	3,75	4.1	3,4	0.09		
	S. de Hesse	57,7	18,6	3,8	0.18	1,8	6,5	7,4	1,52			
Basaltos	B. de la Prusia Renana	53.6	14,4	1,6	8,7	0.41	8,0	5.6	2,03	0,16		
	B. del Colorado	46,7	18,0	2,6	6,2	5,7	8,2	3,0	3,9	0,81		
	B. de las Azores	45,4	17,0	9,9	3,2	5,0	10,7	3,2	1,1	1,27		
	B. del Parque Nacional	51,7	15,1	2,1	8,5	8,1	8,7	2,3	1.8	0,21		
	B. del Tirol	51.6	12,1	8,6	3,1	9,4	9,1	3,1	0,3	0,26		
Traquitas	Dolomita	66,7	16,6	2,3	0,87	1,08	1,48	5,8	4,6	0,06		
	—	65,5	16,8	2,2	1,11	0,41	2.07	6,5	4,1	0 07		
	—	65,1	17,7	1,4	1,27	0,79	2,32	6,6	4,3	0,06		
	Pómez	60,1	17,9	1,34	1,53	0,26	2,2	6.2	3,8	0,05		
	—	73,9	10.9	0,08	1,06	1,08	1,58	4.08	4,6			
	Traquita micácea del Vesubio	53,1	19.9	1.09	2.9	3.1	5,4	5,9	6,6		0,54	
Lavas	L. cristalina del Etna	49,7	18,3	2,8	6,2	3,4	9.7	4,9	1,9	0,03		
	Leucitefrita (Vesubio)	47,8	18.0	2,0	6,7	4,1	9,0	2,7	7,4	0,56		
	L. del Vesubio	47,5	18,6	1,5	7,6	3,8	9,1	2.7	7,0			
Micasquistos	M. de Suecia	75,4	12,7	1,4	2,06	0,36	0,63	0,71	4,4		2,14	
	M. de la provincia de Mesina	57,6	17,9		9,1	3.3	3,2	1,1	3,8	0,38	3,19	
Gneis	G. de Freiberg	68,0	15,1	1,4	3,1	1,3	1,8	2,9	4,2	0,12	0.91	
Andesitas	A. del Mont-Pelé	59,4	18,5	0,7	4,6	2,45	6,8	3,7	0,86		3,12	
	A. con hipersteno (Colorado)	62,0	17,8	4,40		2,64	5,3	4,3	1,47	0,29	1,16	

Composición de algunos minerales comunes

	Nombres de los minerales	Forma cristalina	Fórmulas	Composición
	Sílice (cuarzo hialino; cristal de roca).	Hexagonal	SiO^2	Ácido silícico anhidro.
Feldespatos	Ortosa (ortoclasa)	Clinorrómbica	$K^2O.\ Al^2O^3.\ 6SiO^2$	Silicato de aluminio y de potasio: contiene á menudo cantidades notables de sosa, indicios de cal y de magnesia.
Feldespatos	Anortita. . .	Triclínica	$CaO.\ Al^2O^3.\ 2SiO^2$	Silicato de aluminio y de calcio; contiene también pequeñas cantidades de hierro, magnesia, sosa y potasa.
Feldespatos	Andesina. .	—	$RO.\ Al^2O^3.\ 4SiO^2$	$(R=(Ca, Na^2)$. Silicato de aluminio, sodio y calcio, conteniendo algo de potasa y de magnesia.
Feldespatos	Oligoclasa .	—	$Na^2O.\ Al^2O^3.\ 5SiO^2$	Silicato de aluminio y sodio (con algo de potasa, cal y magnesia).
Feldespatos	Albita . .	—	$Na^2O.\ Al^2O^3.\ 6SiO^2$	*idem*
Feldespatos	Labradorita.	—	$CaO.\ Al^2O^3.\ 3SiO^2$	Silicato de aluminio y calcio, conteniendo un poco de sodio.
Micas	Muscovita .	Ortorrómbica	$K^2O.\ 3Al^2O^3.\ 6SiO^2.\ 2H^2O$	Silicato hidratado de aluminio y potasio, con indicios de hierro, magnesia y cal.
Micas	Biotita . .	—	$2RO.\ SiO^2$	$(R=Mg, K^2, Al\ ^2/_3)$. Silicato de aluminio y magnesio, con cantidades variables de óxidos ferroso y férrico, potasa, sosa y cal.
Micas	Lepidolita .	—	$(Li^2, K^2, H^2)O.\ Al^2O^3.\ 2SiO^2$	Silicato hidratado de aluminio, potasio y litio (con flúor).

Cloritas	Penina	Rombоédrica	$7MgO.Al^2O^3.4SiO^2.5H^2O$	Silicato hidratado de aluminio y magnesio, á menudo ferrífero.
Cloritas	Clinocloro	Clinorrómbica	$8MgO.Al^2O^3.5SiO^2.7H^2O$	Idem. Contiene hierro y á veces cromo.
Amfíboles	Tremolita	—	$Ca(Fe.Mg)^3Si^4O^{12}$	Silicato de magnesio y calcio, conteniendo siempre algo de hierro y de magnesia.
Amfíboles	Hornblenda	—	—	Silicato próximo al precedente, conteniendo siempre alúmina y óxido férrico.
Amfíboles	Actinota	—	—	Silicato próximo á la tremolita, pero más rico en óxido ferroso.
Piroxenos	Diopsida	—	$Ca(Fe.Mg)Si^2O^6$	Silicato de calcio y magnesio, mezclado con alúmina; las proporciones de magnesia y de óxido ferroso son, á veces, bastante pequeñas.
Piroxenos	Dialaga	—	—	Silicato más rico en aluminio y en óxido férrico que el anterior.
Piroxenos	Augita	—	—	Este silicato contiene notables cantidades de aluminio (10 por 100) y de óxido de hierro, é indicios de potasa y sosa.
Epidota		—	$4CaO.3Al^2O^3.6SiO^2.H^2O$	Silicato de aluminio y calcio, en el cual el óxido férrico puede reemplazar á una parte de la alúmina, y el óxido ferroso ó la magnesia á una parte de la cal.
Peridota (Olivino)		Ortorrómbica	$2MgO.SiO^2$	Silicato de magnesio, en el cual la magnesia con frecuencia está substituída parcialmente por el óxido ferroso; á veces la substitución es total (Fayalita).

Composición de algunos minerales comunes (Continuación)

	Nombres de los minerales	Forma cristalina	Fórmulas	Composición
	Talco	Ortorrómbica	$3MgO. 4SiO^2. H^2O$	Silicato hidratado de magnesio, con algo de hierro y aluminio.
Silicatos anhidros de aluminio	Andalusita	—	$Al^2O^3. SiO^2$	Silicato anhidro de aluminio.
	Disteno	Triclínica	—	Idem, con un poco de hierro.
Silicatos hidratados de aluminio	Arcillas plásticas	Amorfa		Silicatos hidratados de aluminio, impuros, grises, amarillos, verdes; contienen sílice, á veces feldespato, óxido férrico, pirita, yeso. Si la arcilla contiene calcáreo, se acerca á las *margas*. El limo que forma las tierras vegetales es una mezcla de arcilla y de arena fina, que contiene fosfatos y sulfatos alcalinotérreos, así como también materia orgánica.
	Caolín	Brillo nacarado ó aspecto térreo, á veces escamas rómbicas.	$Al^2O^3. 2SiO^2. 2H^2O$	Silicato hidratado de aluminio blanco, si es puro; á menudo mezclado con cuarzo, mica y óxido férrico.
	Apatitos	Hexagonal	$3(PO^4)^2Ca^3 + CaF^2$	Fluofosfato de calcio, en el cual una parte de flúor puede ser substituída por cloro ó por yodo.

IV

FENÓMENOS QUE DETERMINAN LA DESTRUCCIÓN DE LAS ROCAS

Estando formada la tierra de labor esencialmente por partículas de volumen muy variable, se trata de saber ahora por qué sucesión de fenómenos las rocas macizas, cuya composición acabamos de indicar someramente, han llegado á este estado de división. Cuatro causas intervienen en la formación de la tierra de labor. Hablemos primero de los fenómenos de orden *mecánico*.

A. **Acción de las heladas**. - La acción mecánica del agua al pasar del estado líquido al sólido es extremadamente eficaz cuando se trata de la destrucción de las rocas. Este cambio de estado va acompañado de un aumento de volumen de $^1/_{11}$. Resulta de ello que, cuando una roca impregnada de humedad, sobre todo si existen grietas más ó menos anchas, está expuesta á una temperatura inferior á 0°, el hielo que se forma ejerce sobre las paredes del cuerpo que le aprisiona una presión enorme capaz de romper la masa sólida y de reducirla á fragmentos más pequeños; éstos, á su vez, sufren acciones análogas. Se comprende que esta fragmentación será tanto más completa cuantas más vías de penetración del agua presenta la roca inicial. En este concepto existen grandes diferencias entre las rocas. Por otra parte, lo más común es que la acción química del agua preceda á su acción química. Pronto veremos, efectivamente., que el agua natural (es decir, el agua que contiene en disolución los gases de la atmósfera) disuelve muy desigualmente los elementos constitutivos de las rocas: cuanto más intensa es esta acción disolvente, tantos más puntos vulnerables presenta la masa así atacada por donde puede entrar ulteriormente el agua. El fenómeno de la helada es, pues, una causa de desmenuzamiento de las rocas, aun de las más duras; y, por esto mismo, este fenómeno de orden mecánico tiene gran actividad en la formación del polvo mineral que hemos llamado *tierra de labor*. La seperficie sobre que actúa la helada es tanto mayor cuanto más fácilmente se efectúe la penetración del agua en el seno de las menores partículas sólidas.

B. **Acción de los ventisqueros**. — Un ventisquero se presenta en forma de un torrente helado de pendiente más ó menos acentuada.

La *morena frontal* de un ventisquero es una especie de colina de altura variable, que á veces llega á ser de algunos centenares de metros, que limita al ventisquero por delante. Está formada por bloques de roca, de dimensiones y formas muy variables, empotradas en una masa de barro y arena.

Detrás de esta *colina* hay una muralla de hielo muy potente que representa la pared anterior del ventisquero y cuya base está en contacto con una capa de arena y de fragmentos de roca más ó menos desgastados ó redondeados en forma de guijarros. Los ventisqueros se mueven de una manera continua, pero muy lenta, apenas algunas decenas de centímetros por día. Antes ocupaban una altura incomparablemente mayor que la que hoy tienen. Porque, encima de los actuales ventisqueros, se observan, en las rocas que forman las paredes de la garganta donde están encerrados, fenómenos de estriado y de pulimentación producidos por el roce del hielo sobre la superficie ó por el roce de las piedras empotradas en el hielo y cuyo arrastre ha desgastado las rocas de la pared. Si los ventisqueros, en su avance, desgastan las paredes rocosas de su garganta y transportan en el seno de su masa fragmentos de tamaño muy variable, reciben también en su superficie restos de rocas que la lluvia ó la acción de las heladas han desprendido de las partes superiores de la garganta y que se incrustan poco á poco en el espesor del hielo.

La morena frontal que termina el ventisquero está formada, pues, de restos de rocas más ó menos redondeados, de restos arenosos y barros, que representan los productos de la trituración, y también de la alteración, de los minerales constitutivos de las rocas. Así, los ventisqueros abren el suelo de los valles por donde se mueven y transportan bloques y piedras procedentes de las montañas próximas; éstas tienden, pues, por este motivo, á disminuir en altura. Esta poderosa acción de los ventisqueros es una de las causas mecánicas de la formación de estos restos de rocas pulverizadas que constituyen la tierra de labor. Los ventisqueros, en una época en la cual abundaban mucho más que en la actualidad, han contribuído en alto grado á la formación del suelo. Hoy su acción es infinitamente más limitada; está restringida á las regiones elevadas, de temperatura bastante fija, en las que pueden acumularse masas de nieve de volumen considerable. Pero, en tiempos lejanos, esta acción de los ventisqueros, como causa primera de la formación de los suelos agrícolas, ha debido ser mucho más general, como se observa actualmente en muchas regiones montañosas cuyas cimas no llevan ya, sin embargo, nieves perpetuas y que no están cubiertas de nieve durante los meses del verano. En la parte baja de los valles, en efecto, se encuentran morenas más ó menos considerables y, en las paredes de las rocas que limitan lateralmente estos valles, se ven señales evidentes de estrías longitudinales. Los llamados *bloques erráticos*, masas de roca de un volumen á veces muy considerable,

que se encuentran en la superficie del suelo en medios de constitución muy diferente de la suya, han sido arrastrados por ventisqueros de que no existe ya rastro, pero de los cuales son testimonios irrefutables. Estos bloques erráticos se hallan diseminados en multitud de regiones.

Al lado de la acción de las heladas se pueden mencionar los efectos producidos por las variaciones de temperatura en general como una de las causas de la destrucción de las rocas. No siendo el mismo el coeficiente de dilatación de sus distintos componentes, se comprende que, por efecto de variaciones bruscas de temperatura, se deben producir ensanchamientos ó contracciones de tal naturaleza que favorezcan la formación de hendiduras por donde puedan penetrar el agua y el aire.

C. **Acción de los torrentes.** — Cuando, en la parte superior de un valle, una roca es minada en su base por el agua ó cambia de lugar por resbalar, hay dislocación de la masa y formación de bloques de dimensiones muy variables. En el momento en que la parte de las aguas de lluvia que no se infiltra en el suelo corre por la superficie, se producen en estos fragmentos de roca efectos mecánicos tanto más enérgicos cuanto mayor es el volumen de agua y más marcada la pendiente por donde esta agua resbala. Las masas dislocadas son, pues, arrastradas mecánicamente; chocan unas con otras, se dividen y se pulverizan. Sus ángulos salientes se desgastan y los fragmentos toman la forma de masas redondeadas, de cantos rodados, cuyo volumen disminuye tanto más cuanto más dura la acción mecánica de arrastre. Además, los pedazos de roca que van á parar de este modo al cauce del torrente encuentran otras masas inmóviles, sujetas á las paredes, y producen en ellas fenómenos de erosión análogos á los que acabamos de describir en los ventisqueros. Con frecuencia, estas masas se desprenden y van á aumentar el número de los fragmentos de rocas que el torrente arrastra. Esta disgregación mecánica origina fragmentos de tamaño muy variable según la vulnerabilidad de la roca y la fuerza mecánica á que ha estado sometida. Se encuentran, en efecto, entre los productos de este ataque mecánico, todos los grados de división, hasta polvo impalpable. Este ataque es, pues, una poderosa causa de desorganización de las rocas, con formación de estos restos sólidos de dimensiones extremadamente variadas que hemos dicho caracterizaban á la tierra de labor.

Por otra parte, esta acción mecánica del agua se completa siempre por fenómenos químicos. Éstos pueden ser de dos órdenes: disolución pura y simple de los elementos sin cambio de composición; ó bien, y es lo más frecuente, profundo ataque de ciertos componentes de la roca por el gas carbónico y el oxígeno disueltos en el agua y formación de nuevos elementos derivados. Examinaremos más adelante esta cuestión detenidamente. Se comprende con faci-

lidad que el agua, como agente químico, ejerce sobre las rocas una acción, cualquiera que sea su naturaleza, tanto más profunda cuanto más perfecto sea el estado de división de estas rocas, división que ha sido efectuada por los fenómenos mecánicos que estamos examinando.

El arrastre de materiales por las aguas torrenciales disminuye con la pendiente. Los fragmentos mayores que el agua ha llevado consigo se detienen, pero muchos fragmentos siguen su camino y se depositan en un sitio tanto más lejano de su punto de partida cuanto más pequeño es su tamaño. Los elementos más tenues hasta pueden permanecer en suspensión mucho tiempo (1), no depositándose más que en los estuarios de los ríos (formación de *deltas*). Sin embargo, en este último caso, la precipitación de las partículas suspendidas es debida, con frecuencia, á una reacción especial, de naturaleza físico-química: las más finas de estas partículas, formadas ordinariamente de *arcilla*, son *coaguladas* con el contacto de sales disueltas en el agua del mar. Explicaremos más adelante esta cuestión.

Se da el nombre de *aluviones* á los depósitos más ó menos considerables que las aguas dejan en las orillas de los cursos de agua en la época de las avenidas. Estos aluviones enriquecen á menudo las tierras donde se depositan llevando á ellas elementos de fertilidad tomados de regiones situadas á veces á una gran distancia. Pero, recíprocamente, un depósito de aluvión muy arenoso puede empobrecer el suelo donde se forma.

D. **Acciones destructoras debidas á la vegetación.** — Ocurre con frecuencia que semillas, llevadas por el viento, se depositan en una superficie rocosa (2). Si la humedad es suficiente, la semilla germina; la plantita introduce sus raíces en las grietas que la roca presenta y, cuando se trata de plantas arborescentes, estas raíces penetran hasta una profundidad bastante grande. Desgastan la roca, de la que toman para su nutrición ciertos elementos calcáreos ó potásicos, y ensanchan así las cavidades que, á no ser ellas, seguirían á veces siendo imperceptibles. Si, en virtud de las dimensiones de estas cavidades, el agua penetra más fácilmente y adquiere el estado sólido por la acción de las heladas, se comprende que

(1) La arcilla puede mantenerse en suspensión en el agua pura durante mucho tiempo. He tenido ocasión de observar que un líquido en que había puesto arcilla en suspensión, al cabo de una porción de semanas aun no era límpido. — C. B.

(2) Entre los gérmenes de vida vegetal que los vientos transportan figuran las asociaciones simbióticas de algas y hongos que constituyen los líquenes. En forma de corpúsculos pequeños, sumamente ligeros y de superficie relativamente grande con respecto á su peso, son llevados por el viento á enormes distancias y cuando quedan en reposo en un sitio donde hallan elementos suficientes, principian en seguida a ejercer su actividad.

Algún autor moderno ha llegado á suponer qué gérmenes de vida podrán pasar de la tierra á los espacios interestelares por efecto de la llamada presión de la radiación.—C. B

constituya el hecho de que hablamos una causa de fragmentación no despreciable. Además, las raíces, cuando han adquirido cierto volumen, actúan á modo de cuña y pueden abrir paulatinamente masas de roca aunque sean muy resistentes. Sobre estas masas, así divididas, que tienen una superficie mucho más extensa que la de la masa primitiva, vendrán á ejercerse nuevas acciones semejantes.

Otra causa, muy lenta aunque muy real, de destrucción de las rocas es imputable al desarrollo en su superficie de vegetales inferiores, musgos, líquenes, algas microscópicas y hasta microbios. No es ésta la ocasión de discutir la parte que toman en la erosión de las rocas las secreciones ácidas de las raíces. Cierto es que, cuando estos vegetales mueren, dejan la materia mineral que habían tomado de la roca; de aquí la presencia en la superficie de ésta de una capa de *polvo mineral* que las lluvias arrastran y llevan á regiones más bajas.

Todas las acciones mecánicas que acabamos de analizar conducen á una fragmentación de las rocas: la escala de tamaño de los fragmentos que se originan abarca desde el de masas que pesan muchos kilogramos hasta el de elementos imponderables (1).

V

FENÓMENOS DE ORDEN QUÍMICO

Los fenómenos de destrucción y de transformación atribuibles á las acciones químicas son enseñados desde largo tiempo en la forma que acabamos de exponer. Sin embargo, hace algunos años que, á consecuencia de observaciones microscópicas hechas en *láminas delgadas de tierra*, cortadas del mismo modo que la roca maciza, apareció una nueva teoría según la cual la persistencia casi integral, en cuanto á su composición química, de los fragmentos rocosos primitivos, parece ser la regla general.

(1) Entre los agentes de disgregación mecánica de las rocas figuran también los *vientos*, sobre todo cuando llevan consigo partículas duras. La corriente de aire produce al tropezar con las rocas en estas condiciones un desgaste, comparable en cierto modo al esmerilado del vidrio por medio de un chorro de arena.—C. B.

Expondremos por de pronto los hechos tal como se acostumbran á presentar según el método clásico, que, nos apresuramos á añadir, explica muy bien, á lo menos en la mayoría de los casos, las transformaciones químicas sufridas por las rocas y la naturaleza de los productos de ellas derivados. Discutiremos luego estas opiniones clásicas comparándolas con las de la nueva teoría.

Los fenómenos de orden químico que hemos de examinar se caracterizan por la acción disolvente del agua pura, por la del agua más ó menos cargada de los gases normales de la atmósfera, oxígeno y gas carbónico, y por la del agua que contiene en solución substancias salinas ú orgánicas. Hagamos observar que, en principio, los fenómenos químicos que ejercen el agua y el gas carbónico sobre las rocas están regidos por la ley de la *acción de masa* (véase más adelante). Por débil que sea el efecto de estos agentes respecto de la descomposición de una roca determinada, esta acción se repite continuamente; los productos de destrucción formados se eliminan y salen del campo de la reacción, de manera que puede efectuarse un nuevo ataque, porque el agua se renueva sin cesar, y esto ocurre hasta la destrucción total de la roca. Podría darse el caso de un estado de equilibrio únicamente si los productos de la reacción quedasen en contacto unos de otros; pero esto nunca ocurre, á lo menos en la superficie de las rocas y en las regiones superficiales del globo. Con todo, este estado de equilibrio, de que acabamos de hablar, puede realizarse en las regiones profundas donde pueden coexistir en las mismas proporciones: el agua, el gas carbónico y la roca atacada; de manera que la alteración de ésta será infinitamente menos marcada que en la superficie (Ramann).

A. **Disolución por el agua pura.**—Si suponemos por un instante que el agua está completamente exenta de materias salinas y de gases disueltos, su poder disolvente será extremadamente débil respecto de la mayoría de las rocas. La sal gema y el sulfato de cal solamente se disuelven en ella. El cuarzo es insoluble en el agua pura. Placas de este mineral resisten la acción del agua á la tempe

ratura de 25° y á la presión de 1800 atmósferas (Spezia). Según algunos autores, la sílice amorfa se disuelve muy escasamente cuando se eleva la temperatura, y el residuo que quedaría después de la evaporación sería el *ópalo*. Según Le Chatelier, la sílice no forma hidratos con el agua; siempre es anhidra. La sílice precipitada, en estado de extremada división, sería del todo insoluble en el agua y la misma insolubilidad explicaría su grado de finura.

Pero, si el agua completamente pura es un disolvente bastante malo de la mayoría de las rocas, puede, en cambio, en contacto con algunas de ellas, entrar en reacción con una determinada especie mineral y suministrar un *producto de hidratación*. Se puede citar, como ejemplo, la transformación de la *anhidrita* (sulfato cálcico anhidro, ortorrómbico) en *yeso* (sulfato cálcico bihidratado, clinorrómbico), así como la conversión de ciertos óxidos de hierro anhidros en *limonita* (óxido hidratado). Las *zeolitas* (ζέω, hiervo) son silicatos *hidratados* de aluminio y bases alcalinas ó alcalinotérreas (K, Na, Ba, Ca); no contienen magnesia; ordinariamente llenan las cavidades formadas en las rocas básicas; estas zeolitas deben ser consideradas como *productos de alteración* de ciertas rocas.

La acción del agua es, pues, de primera importancia, dado que los fenómenos de hidratación preceden siempre á las acciones químicas más profundas.

B. **Disolución por el agua que contiene los gases de la atmósfera.**—Las aguas naturales, ya procedan de la lluvia, ya de los ríos, nunca son puras. En primer lugar, siempre disuelven cierta cantidad de los gases del aire. Suponiendo que el agua pura fuese saturada de oxígeno y de gas carbónico, contendría, á 10° y por litro, 53 miligramos del primero de estos gases, esto es, 37 centímetros cúbicos, y 2,319 gramos del segundo, ó sea, 1170 centímetros cúbicos, á la presión atmosférica normal. Pero las aguas naturales no están saturadas; el agua de lluvia no contiene en realidad más que algunos centímetros cúbicos de oxígeno y menos aún de gas carbónico.

Las aguas meteóricas contienen también pequeñas cantidades de nitrito, nitrato y carbonato amónicos, así como indicios de sal marina. Sin embargo, cerca del mar, la cantidad de cloruro sódico que es arrastrada por los vientos á veces es bastante considerable. Las aguas de río son marcadamente más ricas en sales minerales: cloruros, sulfatos, nitratos, carbonatos. El poder disolvente del agua aumenta singularmente con la presencia de gases y de materias sólidas que contiene. Además, infiltrándose á través del suelo, las aguas meteóricas se enriquecen en ácido carbónico; disuelven, por otra parte, ciertas substancias salinas y orgánicas (materias húmicas) que todavía aumentan su energía química. Cuando penetra en las hendiduras de las rocas, el agua pierde una gran parte de los gases que contenía en disolución, y éstos pueden actuar de una manera eficaz

sobre ciertos elementos sólidos. Pero, cualesquiera que sean la intensidad y la continuidad de la acción del gas carbónico, *el agua sola actúa primero sobre la roca como agente de hidratación;* este fenómeno primordial de la hidratación precede siempre á las acciones químicas ulteriores imputables á las substancias que el agua lleva en disolución. Admitida esta hidratación, examinemos los efectos que produce en las rocas la presencia de los gases carbónico y oxígeno disueltos en el agua.

Acción de los gases carbónico y oxígeno.—Estos efectos se hacen sentir en todas las rocas silicatadas, sin excepción; serán tanto más profundos cuanto mejor hayan preparado la roca las acciones mecánicas y físicas que antes hemos estudiado, esto es, según la hayan dividido más ó menos.

Sabemos que las rocas silicatadas contienen sílice combinada con las siguientes bases: potasa, sosa, cal, magnesia, óxido de hierro, alúmina. En principio, *el gas carbónico descompone los silicatos:* pone en libertad una parte de la sílice (otra parte queda unida á los álcalis) y se combina con todas las bases para formar carbonatos. La *alúmina sola* resiste á esta carbonatación; queda combinada con cierta cantidad de la sílice primitiva. El silicato de aluminio así formado se hidrata y constituye la *arcilla*. Se da el nombre de *caolinización* á esta transformación que sufren las rocas silicatadas primitivas, porque el producto principal es una substancia cuyas propiedades físicas se parecen algo á las del *caolín* ó silicato de aluminio hidratado puro. Este modo de formación de la arcilla fué indicado, por vez primera, por Fournet (1833). La arcilla propiamente dicha sólo raramente está formada por silicato de aluminio hidratado puro: contiene siempre una cantidad más ó menos notable de los elementos de la roca primitiva, de la cual parece ser así un producto de descomposición.

En la gran mayoría de casos es coloreada, ya en gris, ya en rojo, por el óxido de hierro: porque, si el ataque del hierro contenido en las rocas silicatadas conduce á la producción de un carbonato ferroso, éste, extremadamente oxidable, suministra óxido férrico con desprendimiento de gas carbónico: de donde se deriva la persistencia de este óxido en la mayor parte de las arcillas. Pero, además, el color de la arcilla es atribuíble con frecuencia á la presencia de materias orgánicas: insistiremos más adelante en este asunto.

El caolín puro es blanco y está exento de hierro. Cuanto más se acerca la composición de una arcilla á la del caolín, mayor es su plasticidad. Estudiaremos en su lugar las notables propiedades que comunica la arcilla á las tierras de cultivo.

Examinemos ahora con algún cuidado esta acción descomponente del ácido carbónico sobre los silicatos. La sílice que el ácido carbónico pone en libertad puede ser arrastrada en disolución (?) ó persis-

tir en la roca así alterada en forma de venas. En cuanto á los granos de cuarzo cristalizado que contienen las rocas ácidas, son muy poco atacados. Si las aguas de infiltración están en cantidad suficiente, se llevan consigo en estado de bicarbonatos los carbonatos que acaban de formarse; se llevan también partículas extremadamente finas de arcilla: finalmente no queda más que el cuarzo (arenas). La cal y la magnesia disueltas en estado de carbonatos, ó mejor dicho, de bicarbonatos, no se depositan hasta que, por una causa cualquiera, se desprende el exceso del gas carbónico. Después de haber sufrido la carbonatación, los elementos ferrosos de la roca primitiva se oxidan: desprenden gas carbónico y se convierten en óxido férrico hidratado.

Los carbonatos alcalinos (potasa y sosa), mucho más difusibles porque son muy solubles, serían arrastrados sin la existencia de una propiedad muy característica que poseen muchos suelos de retener estas bases en un estado particular. Esta eliminación de bases de la roca primitiva por la influencia del gas carbónico nunca es completa: la potasa y la sosa siguen en parte en estado de silicatos solubles hidratados después de la marcha de la cal, de la magnesia y del óxido de hierro.

La acción del gas carbónico se hace sentir á veces hasta á grandes profundidades (muchas decenas de metros). Sin embargo, es limitada por efecto de los fenómenos de equilibrio de que antes hemos hablado. Pero, en los países de clima seco y de temperatura uniforme, se concibe que las rocas silicatadas, y el granito en particular, que es la más común de estas rocas, no sufran más que muy ligeras alteraciones.

Acción profunda del gas carbónico. — Volvamos un momento á ocuparnos del poder disolvente del agua cargada de gas carbónico. Gracias á la formación de bicarbonatos alcalinotérreos, mucho más solubles que los carbonatos neutros, algunos suelos pueden cambiar completamente de naturaleza. En un gran número de regiones el carbonato cálcico frecuentemente está mezclado con arena silícea y arcilla, esto es, con substancias sobre las cuales el agua no tiene prácticamente poder disolvente alguno. Actuando las aguas meteóricas sobre este calcáreo impuro, disuelven el carbonato cálcico en estado de bicarbonato y lo arrastran, á veces, á una profundidad de muchos metros. Esta *descalcificación* va acompañada, pues, de la formación allí mismo de una capa arcilloarenosa, cuyo color primitivo cambia con los progresos de la descalcificación, porque los elementos ferruginosos que contenía la roca calcárea inicial se oxidan poco á poco convirtiéndose en óxido férrico. Por lo cual este fenómeno ha sido llamado *rubefacción*. Así, á causa de las transformaciones que acaban de ser descritas, se ve que un suelo arcilloso, á veces de notable espesor, substituye á una roca primitivamente calcárea.

Councler (1883) ha dado un notable ejemplo de ello relativo á

un suelo calcáreo del distrito forestal de Lorha (1). El suelo estaba formado por una capa de 2 á 4 centímetros de arcilla coloreada por el humus, debajo de la cual había una capa de 25 á 30 centímetros de arcilla cuyo color variaba del gris al pardo negruzco. A un nivel inferior, se encontraba, en un grueso de 5 á 16 centímetros, una arcilla amarilla. Todo este conjunto estaba superpuesto á una roca calcárea. He aquí la composición centesimal de estas diferentes capas:

	Capa superior	Capa media	Capa inferior	Roca
Potasa. . . .	2,32	2,64	2,65	0,39
Sosa	0,66	1,09	0,93	0,30
Cal.	1,14	1,16	1,16	52,98
Magnesia . . .	0,94	0,99	0,83	0,76
Óxido de hierro .	3,82	3,90	6,53	0,51
Alúmina . . .	9,83	12,13	17,60	0,90
Acido fosfórico .	0,21	0,22	0,20	0,03
Sílice	63,57	67,74	54,13	2,06
Acido carbónico .	0,14	0,56	1,11	41,74
Agua	7,59	4,26	8,70	0,21

Así, la capa arcillosa en contacto inmediato con la roca, ha sido despojada de carbonato cálcico por efecto de la acción disolvente de las aguas meteóricas.

Los esquistos, en razón de su estructura, experimentan fácilmente la caolinización; se transforman con mayor ó menor rapidez, á veces en el espacio de algunos años, en arcilla plástica (esquistos hullíferos puestos al descubierto).

¿Qué se hace de las aguas cuya acción química de carbonatación ha producido los fenómenos de descomposición que acabamos de mencionar, y que se infiltran á mayores ó menores profundidades? La parte de estas aguas que vuelve á la superficie del suelo, á un nivel forzosamente inferior al del punto de partida, restituye una parte de los materiales que estas aguas habían tomado de las capas por ellas atravesadas. Su riqueza en elementos sólidos está evidentemente subordinada á la solubilidad de las rocas que han encontrado; las aguas procedentes del granito son á veces diez veces más pobres que las que han estado en contacto con ciertas rocas calcáreas. Así es que en los puntos de emergencia ó de escurrimiento se ven formar depósitos ferruginosos, debidos á la descomposición rápida del bicarbonato de hierro, y sobre todo depósitos calcáreos (tobas, estalactitas), de formación más lenta á medida que la disolución pierde, en contacto con el aire, el exceso de gas carbónico que contenía.

Los fenómenos de caolinización que antes hemos descrito pueden

(1) Citado por Ramann (*Bodenkunde*, 2.ª edicion, Berlin, 1905, pág. 101.)

á veces ser observados donde ocurren; pero la excesiva lentitud de su evolución es, con frecuencia, un obstáculo para la observación directa. Sin embargo, el análisis químico permite explicar de una manera notable estas reacciones de transformación, cuando se aplica al estudio comparativo de una roca no alterada y de sus productos de alteración. Un gran número de experiencias *sintéticas* autoriza igualmente la interpretación de los fenómenos de descomposición en el sentido que acabamos de indicar. Vamos á examinar estos diferentes puntos.

VI

EXAMEN COMPARATIVO DE LAS ROCAS NO ALTERADAS Y DE LAS ROCAS ALTERADAS

Degradación de los feldespatos. — Comparemos por de pronto, desde el punto de vista teórico, la composición centesimal de un *feldespato ortosa*, suponiéndolo puro: $K^2O.Al^2O^3.6SiO^2$, con la del caolín ó *silicato hidratado de aluminio* puro: $Al^2O^3.2SiO^2.2H^2O$

	Ortosa	Caolín
SiO^2	64,86	46,64
Al^2O^3	18,28	39,46
K^2O	16,86	
H^2O		13,90
	100,00	100,00

Se puede hacer la comparación de otra manera aún más clara. 100 partes de feldespato suministran — si se supone que la alúmina no sufre pérdida de peso alguno al pasar del feldespato al caolín — 46,32 partes de este último cuerpo, cuya composición está representada por:

SiO^2	21,60
Al^2O^3	18,28
H^2O	6,44
	46,32

Ha habido, pues, una pérdida de 64,86 — 21,60 = 43,26 de SiO^2; pérdida de 16,86 K^2O y ganancia de 6,44 de agua,

Investigaciones de Ebelmen. — Se debe á Ebelmen (1845) un gran número de investigaciones sobre la composición comparada de ciertas rocas primitivas inalteradas y de sus productos de alteración; estos trabajos confirman claramente el mecanismo de la formación de la arcilla tal como lo hemos expuesto. Pero los productos de alteración no son, en conjunto, substancias definidas: son *mezclas complejas* en las cuales el análisis revela la constante presencia de los mismos elementos que la roca primitiva contenía, pero todas cuyas bases, excepto la alúmina, han sufrido una merma más ó menos considerable. Citemos algunos ejemplos.

Ebelmen examinó un fragmento redondeado de basalto del Alto Loira, cuya superficie, hasta 5 ó 6 milímetros de profundidad, estaba convertida en una materia térrea, de color blanco algo amarillento, quebradiza, que se desprendía fácilmente. El interior de la masa era roca compacta de color negro pronunciado. La comparación de los análisis de la parte superficial alterada y de la parte profunda intacta proporciona datos muy interesantes, sobre todo si, como hizo Ebelmen, se refiere la composición de las dos materias á una proporción constante de alúmina, por ejemplo 100 partes.

	Basalto no alterado	Basalto alterado
Alúmina	100,00	100,00
Sílice	347,5	118,30
Cal.	55,1	29,2
Oxido de hierro	138,7	14,1
Magnesia	52,8	1,9
Potasa	13,4	2,3
Sosa	20,3	3,3
Agua	37,0	55,1

Además de la fijación de agua procedente de esta descomposición, se observa una pérdida, en proporciones más ó menos notables, de todas las substancias, fuera de la alúmina.

Ebelmen comparó también el análisis de un basalto de Bohemia con el de sus productos de alteración. Este basalto principia por dividirse en bolas que se separan de la masa principal y se descomponen en seguida en toda su superficie exterior. La parte central de estos pedazos es gris negruzca y de aspecto ya térreo, deleznable, mientras que el basalto no alterado es negro y muy duro. La parte exterior de las bolas es de color blanco agrisado; se pasa insensiblemente del color del exterior al del interior. Mediante el análisis se han encontrado las siguientes cifras, refiriendo, como antes, la composición á una proporción constante de alúmina (100):

	Basalto no alterado	Basalto en el centro de los trozos	Basalto en la superficie de los trozos
Alúmina	100	100	100
Sílice	364	309	237
Cal	93	87	14
Magnesia	76	52	19
Peróxido de hierro	29	39	64
Protóxido de hierro	99	60	0
Potasa	6	} 4	} 1
Sosa	22		
Agua	36	68	114

En el primer período de su descomposición, el basalto (del centro de los fragmentos) ha perdido la casi totalidad de los álcalis y una cierta cantidad de hierro y de magnesia, mientras que la pérdida de cal es poco notable. Pero en la superficie, esto es, en la región de alteración más avanzada, el hierro aun ha disminuído y ya no existe más que en estado férrico; la cal en gran parte ha desaparecido. Como hace notar Ebelmen, el primer período corresponde al arrastre de los álcalis, esto es, á la destrucción del elemento feldespático (véase lo dicho antes en la pág. 23 sobre la composición de los basaltos), el segundo corresponde á la alteración del piroxeno y de la peridota que pierden una parte de su sílice y la mayor parte de sus bases.

Importa mucho conocer estos fenómenos de destrucción química cuando se desea formar concepto exacto de la extremada variedad de estructura que presentan los diferentes suelos. Veremos más adelante nuevos ejemplos en apoyo de esta opinión. Así, el gas carbónico separa los elementos de los silicatos complejos, pone en libertad cierta cantidad de sílice y forma con las bases, exceptuando la alúmina, bicarbonatos más ó menos solubles.

En las aguas que filtran á través del suelo, el gas carbónico está en gran exceso respecto de la sílice. Todas las aguas minerales contienen sílice y carbonatos, pero nunca silicatos, y sólo indicios de alúmina.

Laterita. — En las regiones tropicales, y por causas mal conocidas actualmente, pero que parece pueden ser referidas á acciones microbianas, las rocas feldespáticas experimentan una descomposición más profunda que la que acabamos de examinar. La arcilla abandona la casi totalidad de su sílice y deja una mezcla de hidrato de alúmina (*hidrargilita* $Al(OH)^3$) y de hidrato férrico, conocido con el nombre de *laterita* (de *later*, ladrillo). Las lateritas tienen una composición análoga á la de la *bauxita*. Las lateritas contienen también silicatos alumínicos hidratados (Arsandaux, 1909). Schlœsing demostró (1901) que, si las tierras de Francia no contienen más que muy pequeñas cantidades de alúmina libre (cuya presencia

se pone de manifiesto tratando estas tierras por sosa en la proporción de 3,5 gramos de Na_2O por litro), las tierras de Madagascar contienen frecuentemente considerables proporciones, ya en estado libre, ya formando parte de un silicato muy atacable por la sosa diluída. Pues bien, una arcilla muy grasa de Vanves y un caolín muy magro no contienen sílice, ni alúmina libres, solubles en la solución sódica indicada antes.

Experimentos sintéticos.—Hemos dicho anteriormente que el agua sola era un mal disolvente de los elementos de las rocas. Pero, si se pulveriza previamente la materia y si se pone en contacto con el agua, algunos de sus elementos son bastante solubles para que se les pueda reconocer cualitativamente y aun dosificar. W. B. y R. E. Roggers han demostrado (1848) que los minerales y rocas siguientes ceden al agua algunos de sus elementos: feldespatos, labradorita, mica, leucita, turmalina, hornblenda, olivino, epidota, talco, clorita, obsidiana, lavas, gneis, vidrios, etc. Un gran número de experimentadores han comprobado después la verdad de estos hechos. Según Cushman, el polvo de ciertas rocas (cuarcitas, granitos, diabasa, basalto, gneis, etc.) da, en contacto del agua, soluciones de alcalinidad manifiesta con la ftaleína.

Experimentos de Daubrée. — Se deben á Daubrée (1) algunos experimentos destinados á imitar las condiciones naturales de desagregación de las rocas, ya en sus efectos físicos, ya en sus efectos químicos. Es conveniente mencionar aquí algunos ensayos destinados á completar el conocimiento de los fenómenos naturales que acabamos de estudiar.

Si se trituran mecánicamente fragmentos de roca inmergidos en el agua, se forma un polvo muy fino, formado, no de arena, sino de un limo impalpable, que puede permanecer muchos días en suspensión en el líquido. Este limo, muy plástico, se solidifica por desecación formando masas extremadamente duras, entremezcladas de láminas micáceas, cuando procede de la destrucción del granito: además, fija cierta dosis de agua. Las rocas cuarzosas suministran cierta proporción de arena propiamente tal. El feldespato, tan abundante en la roca granítica primitiva, desaparece casi por completo. En efecto, al lado de los fenómenos mecánicos, y simultáneamente, aparecen fenómenos de orden químico.

(1) Études synthétiques de géologie expérimentale, Paris, 1879.

El feldespato, en fragmentos, triturado mucho tiempo en cilindros de gres dentro de agua destilada, comunica á ésta cierto grado de alcalinidad atribuíble á la presencia de silicato potásico. Cuando el cilindro de gres es substituído por un cilindro de hierro, la sílice se une á este metal y el agua no contiene más que potasa; el hierro, muy dividido, se ha oxidado durante el movimiento de trituración. La acción es notable; Daubrée la ha medido cuantitativamente: 3 kilogramos de feldespato, después de trituración prolongada durante ciento noventa y dos horas en un cilindro de hierro, que correspondría á un recorrido de 460 kilómetros, formaron 2720 gramos de limo y los cinco litros de agua empleados en el experimento se cargaron de 12,60 gramos de potasa, ó sea de 2,52 gramos por litro. Un hecho igualmente digno de ser notado es el siguiente: La sola trituración en seco no obra de una manera bien apreciable; la descomposición, tal como acabamos de señalar, no se ha realizado más que cuando se efectúan simultáneamente la destrucción mecánica y la acción disolvente del agua.

Cuando se emplea agua saturada de gas carbónico, que se hace actuar sobre fragmentos de roca dispuestos en un vaso de gres que se somete á una rotación de diez días, la descomposición es bien patente; da origen á productos análogos á los que forma el agua sola. Estos hechos demuestran que la potasa, que está en combinación en las rocas feldespáticas, puede entrar lentamente en disolución, y debe reconocerse en este fenómeno una de las fuentes de potasa que las plantas aprovechan. Encontraremos, por otra parte, hechos análogos en los demás principios minerales de las rocas cuyos elementos son útiles á los vegetales.

Consecuencias de la alteración de las rocas. Acción del gas carbónico á presión. — Parece que el primer estado que afectan los restos de las rocas más finas, cuando son trituradas en contacto con el agua, es el estado *coloide*, esto es, seudosoluble, porque una solución coloidal siempre es turbia y contiene partículas sólidas en suspensión (véanse algunos datos sobre las soluciones coloidales en nuestra *Química vegetal)*. Según Funk (1909), si se aíslan estas partículas y se secan á 120° se encuentra que contienen una proporción de agua variable de 5 á 15 por 100; la roca inicial primero se hidrata; al mismo tiempo hay pérdida de indicios de álcali. Parece, pues, que la transformación de un feldespato en arcilla va precedida de una serie de términos intermedios, y que la absorción del agua representa la primera manifestación de la descomposición. Es preciso añadir también el *enrojecimiento*, que indica la peroxidación del óxido ferroso. Cuando los granos de arena tienen un diámetro inferior á 0,02 mm., afectan las propiedades de los coloides y comunican al suelo los caracteres de los limos. En muchos de éstos existen partículas muy finas de mica que con frecuencia han sido confundidas con la arcilla. Estas partículas tan finas

parecen ser los elementos más característicos de los limos. Desde el punto de vista agrícola los coloides procedentes de las zeolitas tienen grande importancia (Atterberg, 1908).

Fittbogen (1873) hizo ensayos concluyentes sobre la solubilidad de los elementos de las rocas en el agua cargada de gas carbónico. Según este autor, la sílice sería tres veces más soluble en este último caso que en presencia del agua pura. R. Müller (1877) ha demostrado que la presión del gas carbónico aumenta singularmente su acción descomponente. Si se opera á la temperatura ordinaria y á una presión de 3,5 atmósferas de gas carbónico, se encuentra, al cabo de unos cincuenta días, que todos los elementos de las rocas así tratados han entrado en disolución: la alúmina es de mucho la substancia menos soluble en estas condiciones. Un feldespato es tanto menos atacable cuanto más rico es en sílice: cuando contiene cal y sosa es más alterable que si contiene sobre todo potasa. El apatito es fácilmente atacado; la cal y el ácido fosfórico se disuelven sensiblemente en las mismas proporciones en que estos elementos entran en el mineral. Todas las bases, excepto la alúmina, se unen con el ácido carbónico (1).

F. Sestini (1902) trató fragmentos de augita de 1 á 2 milímetros de diámetro con agua pura y con agua cargada de gas carbónico. Después de una agitación de cincuenta horas, entraron en solución, en el agua sola: sílice, óxido férrico, cal, magnesia, indicios de cloro, ácido sulfúrico, potasa y sosa. En el agua cargada de ácido carbónico, el ácido sulfúrico y los álcalis estaban en mayores proporciones que en el agua pura. El polvo fino, obtenido por trituración, estaba formado por fragmentos muy pequeños de augita y una substancia blanca, soluble en los ácidos clorhídrico y sulfúrico, más rica en alúmina y en óxido férrico que la augita. El autor tuvo en cuenta la posible disolución de las paredes del recipiente con que se operaba.

Debe hacerse aquí una observación general. Son objeto de crítica muchos experimentos sintéticos, en los cuales una roca ha sido pulverizada en contacto con materias extrañas y ha sido calentada en tubos de vidrio á una temperatura frecuentemente superior á 100°. Estos experimentos deben ser interpretados con reservas, porque la substancia misma de los recipientes ó de los instrumentos de trituración ha debido entrar con frecuencia en reacción con los productos que se trataba de examinar.

Acción del agua cargada de materias salinas ó de substancias orgánicas. — Después de haber mencionado la acción disolvente del agua pura ó cargada de gas carbó-

(1) Tampoco se une con el ácido carbónico el óxido férrico.—C. B.

nico, es necesario decir dos palabras de la acción del agua que contiene en disolución ciertas materias salinas ó ciertas substancias orgánicas. Por otra parte, en la naturaleza continuamente ocurren efectos semejantes; muchos sabios han hecho respecto de esto experimentos sintéticos que ofrecen algún interés. Casi siempre, cuando el agua contiene en disolución sales de sodio ó de calcio, sobre todo en presencia de gas carbónico, su poder disolvente respecto de las rocas eruptivas es mucho más enérgico. Las substancias previamente disueltas pueden obrar igualmente por doble descomposición y cambiar, á lo menos parcialmente, sus bases con las de las rocas con que entran en contacto. En este concepto, las sales amoniacales gozan de un poder disolvente bastante elevado.

Resulta de antiguos experimentos, debidos á Dietrich, que el sulfato amónico es capaz de disolver, por digestión prolongada en frío durante tres meses, 0,4 por 100 de polvo de basalto y 0,8 por 100 por una ebullición de nueve horas. Más recientemente, Prianischnikow ha probado que las sales amoniacales pueden hacer entrar en disolución, no sólo el fosfato tricálcico, sino también la mica.

Los feldespatos y los silicatos zeolíticos reaccionan con las soluciones de sal marina, aun diluídas. El sodio ocupa el lugar del potasio, del calcio y del magnesio. Este hecho explica la influencia favorable que ejercen ciertos abonos que contienen como impureza sal marina. El empleo de ésta, por otra parte, ha sido á veces preconizado para aumentar la riqueza del suelo en potasa soluble. Volveremos á tratar de estos fenómenos á propósito del poder absorbente de los suelos. Los elementos cálcicos y ferro-magnésicos son atacados con bastante facilidad por una sólución de ácido clorhídrico al 5 por 100. El cloruro cálcico al 5 por 100 quita á los feldespatos ricos en potasa una cantidad de álcali tanto mayor cuanto más finamente pulverizado ha sido el mineral (J. Dumont, 1909).

Debe notarse también que las aguas que atraviesan normalmente el suelo disuelven siempre una pequeña proporción de materia húmica. Estas aguas, efectivamente, tienen un color ambarino particular. Independientemente de las sales que puede contener esta agua, cuyo poder disolvente, según acabamos de decir, es mayor que el del agua pura, la materia húmica comunica al agua propiedades disolventes especiales, tanto más enérgicas cuanto mayor es la cantidad que se encuentra en estado de disolución. Hablaremos más adelante, con los pormenores necesarios, del origen de la materia húmica, en las diferentes formas que afecta en el suelo. Cuando esta materia existe en terrenos no calcáreos, está dotada

de propiedades ácidas muy notables que le permiten descomponer los carbonatos; su poder disolvente sobre los óxidos férricos y sobre los fosfatos es considerable. El ácido húmico descompone los alúminosilicatos alcalinos y les substrae el álcali y hasta la sílice en exceso.

En resumen, el *agua natural* que atraviesa los suelos, esto es, el agua que contiene proporciones variables de gas carbónico, de substancias salinas y de materias húmicas, es un disolvente lento, pero cuya acción es renovada sin cesar, de toda suerte de rocas de la superficie terrestre: á esta acción disolvente se añade siempre una acción química de descomposición.

Los agentes de descomposición de las rocas son, pues, numerosos: agua pura, agua cargada de gas carbónico, agua que contiene en disolución, ya muy diversas sales, ya hasta ácidos y materias orgánicas mal definidas. ¿Cuál de estos agentes es el que posee la energía máxima? Esto depende en absoluto de las condiciones mismas en que se efectúa la descomposición y, según muchos autores, del grado de humedad del sitio considerado y de la naturaleza de su clima.

Papel de los ácidos concentrados, papel de la materia orgánica en la descomposición de las rocas.— Volvamos por un momento á las causas probables de la formación de la arcilla, á las cuales se concede actualmente una gran importancia. Al lado de la acción del agua y de la del gas carbónico como agentes naturales de descomposición de los silicatos y de formación de la arcilla, debe ponerse, según ciertos autores, ya la intervención de factores minerales más enérgicos, ya de las materias orgánicas.

La intervención de los ácidos fuertes (ácidos clorhídrico, fluorhídrico, sulfúrico, nítrico), la intervención, de una manera más general, de aguas minerales ácidas, serían capaces de provocar la caolinización de las rocas feldespáticas (Weinschenk). Se trataría aquí de un fenómeno de *pneumatolisis*, es decir, de la insuflación de vapores ácidos procedentes del interior.

La acción de los ácidos diluídos, de la cual hemos dicho algunas palabras, y la mucho más marcada de los ácidos concentrados, sobre los feldespatos pulverizados, suministra, á la temperatura ordinaria

y por prolongado contacto, una substancia lechosa, blanca, que se parece á la arcilla de porcelana. Sin embargo, debe observarse, con Stremme, que no existe ningún hecho experimental evidente que demuestre de un modo patente que la génesis de la arcilla sea atribuíble á una reacción semejante. En efecto, los ácidos fuertes descomponen el caolín; es, pues, poco admisible que esta substancia pueda originarse en un proceso inverso.

Si bien la formación de la arcilla puede ser explicada á veces por medio del precedente mecanismo, es muy probable, según algunos observadores, que esta substancia proceda, en muchos casos, *del contacto de la materia orgánica con las rocas feldespáticas.* El ácido húmico sería el agente de esta transformación. La mayor parte de las arcillas tienen color gris; con frecuencia tienen un olor propio que no se puede atribuir á la presencia de ninguna materia mineral conocida; desprenden, cuando se calientan, un olor muy vivo y frecuentemente se blanquean, como si la acción del calor hubiera destruído un cuerpo de origen orgánico. Se encuentran, en las capas de humus ó en las turberas, restos de rocas fuertemente caolinizadas y se puede pensar que, después de contacto muy prolongado con las materias húmicas, ha habido descomposición de los feldespatos. La disgregación de las rocas silicatadas bajo la influencia del aire conduce á una peroxidación del hierro que estas rocas contienen; el contacto de la materia orgánica con el residuo de este desmoronamiento reduce nuevamente el óxido férrico á ferroso (Stremme). Muchas arcillas, en efecto, cuando se calcinan al aire, pasan del gris al rojo: como si el óxido ferroso se transformase, por la acción del calor y del oxígeno, en óxido férrico.

¿Á cuál de estos múltiples modos de formación de la arcilla debe concederse mayor importancia? ¿Cuál es el que ejerce una acción preponderante? No se repetirá demasiado: un mismo mineral, en las condiciones naturales, debe descomponerse de muy diferentes maneras según sean las circunstancias del medio.

Desagregación por la influencia del agua y de la vegetación. — En una serie de experimentos interesantes, Haselhoff (1909) ha examinado en cuatro especies de rocas expuestas al aire: *gres abigarrado, grauwacke, calcáreo conchífero, basalto,* la acción de los agentes atmosféricos y la de la vegetación sobre la rapidez de destrucción de estas rocas, así como las cantidades de materias disueltas por el agua de lluvia y la proporción de substancias vegetales absorbidas por las plantas. Cada muestra contenía, si bien en dosis muy variables, los elementos de fertilidad indispensables á la nutrición vegetal, menos el nitrógeno. Los fragmentos de rocas, de 7 á 10 milímetros de diámetro, fueron puestos en cajas de hojalata que podían dejar escurrir los líquidos que por ellas pasaban. Los ensayos han durado cuatro años. He aquí, en pocas palabras, los resultados. El *gres abigarrado* es el que se ha

disgregado más. La presencia de vegetales (habas. guisantes, altramuces, cebada, cuyo desarrollo estaba asegurado por la adición de un poco de nitrógeno nítrico) ha favorecido este desmoronamiento de las rocas; pero no ha habido, en este concepto, grandes diferencias entre las diversas plantas cultivadas. Desde el punto de vista de la rapidez de la descomposición, se observa que la alteración mayor ha sido en el *gres abigarrado*, después en el *basalto* y la *grauwacke*. El *calcáreo conchífero* es poco atacado. El agua de lluvia que había atravesado los vasos tenía los siguientes volúmenes:

Vaso testigo sin fragmentos de roca	Gres	Grauwacke	Calcáreo conchífero	Basalto
80,5 litros	45,9 litros	54,4 litros	55 litros	47,5 litros

He aquí la riqueza de esta agua en elementos disueltos (no citaremos más que lo relativo á la cal y á la potasa) y la proporción inicial de estos elementos en la roca:

	100 partes de la roca inicial contienen		Materias disueltas en el volumen de agua de lluvia recogida	
	CaO	K^2O	CaO	K^2O
			gr.	gr.
Gres.	0,50	13.67	0.18	0,017
Grauwacke. . . .	3,30	1.74	1,03	0,010
Calcáreo conchífero .	52,90	0,34	1,40	0,005
Basalto.	11,00	1,90	0,13	0,054

La riqueza de las aguas en cal y en potasa es, pues, tan variable como la riqueza de las rocas en estas dos bases. Los vegetales cultivados en estos fragmentos de rocas les han quitado notables dosis de elementos minerales; estas dosis varían con la especie cultivada y con la naturaleza de la roca. El *gres abigarrado* es quien cede mejor sus elementos á la vegetación á causa de su más fácil desmoronamiento. Parece que existe la misma relación entre la cantidad de substancia tomada á la roca por la planta y la cantidad de materia que se disuelve en el agua de lluvia.

Se observa, pues, en este experimento sintético, una desagregación natural de la masa sólida por la influencia del agua de lluvia, desagregación que suministra á los vegetales las substancias indispensables á su desarrollo.

Algunas observaciones relativas á la estructura química de los silicatos. — Es difícil hoy expresar por fórmulas racionales la composición de los silicatos, tanto los naturales como los artificiales. Ordinariamente se contenta.

como hemos hecho aquí, con indicar la relación existente entre el anhídrido silícico SiO^2 y los óxidos que están con él combinados. El agua se pone aparte en el caso de los silicatos hidratados, aun cuando en un gran número de ellos, no se trata por cierto de *agua de cristalización*, sino realmente de *agua de constitución*. Se formulan en general los silicatos como se anotan los carbonatos: $SiO^2.M^2O$, $SiO^2.M''O$ representarán silicatos *neutros*, ya que la relación entre el oxígeno de la base al del ácido es igual á 1 2. Los silicatos básicos contendrán, para una molécula de sílice, una cantidad de base mayor que la que indican las dos fórmulas precedentes; los silicatos ácidos presentarán, por el contrario, una relación menor que 1/2. Cuando se trata de silicatos complejos, que contengan muchas bases, se admite en general que estos silicatos son *combinaciones moleculares* de dos ó más silicatos, del mismo modo que el alumbre de potasa, por ejemplo, resulta de la unión del sulfato potásico con el sulfato alumínico, á los cuales se añaden veinticuatro moléculas de agua: $SO^4K^2.(SO^4)^3Al^2.24H^2O$.

Entre los modos más racionales de representación de los silicatos, señalaremos el siguiente que permite explicar bien la descomposición hidrolítica de algunos de ellos.

En vez de formular la ortosa, por ejemplo:

$$[K^2O.Al^2O^3.]\ 6SiO^2 = K^2Al^2Si^6O^{16},$$

se puede suponer que este mineral representa una *sal alúminopotásica* del ácido complejo $H^4Si^3O^8$; la ortosa resulta entonces $[K'Al'']Si^3O^8$, ó sea la mitad de la fórmula precedente. Pero, dada la notable estabilidad del silicato de aluminio, se ha propuesto considerar el aluminio (y el hierro que le substituye parcialmente en muchos casos) como uno de los componentes esenciales del radical ácido. Este debería escribirse así: $Si^3O^8Al(H)$, y la ortosa sería la sal monopotásica $Si^3O^8Al(K)$. Según esta manera de considerar las cosas, la separación del caolín, ó silicato de aluminio hidratado, provendría de la inestabilidad del ácido alúminosilícico. Este se descompondría en sílice y silicato de aluminio anhidro que, en contacto con el agua, se hidrataría ulteriormente.

$$HAlSi^3O^8 = 2SiO^2 + HAlSiO^4$$

$$2HAlSiO^4 + H_2O = Al^2O^3.2H^2O \text{ (Caolín)}$$

La génesis de la arcilla será, pues, independiente de la acción del gas carbónico sobre las rocas silicatadas en general, y esta manera de concebir su formación sería corroborada, según ciertos autores, por el hecho de que los feldespatos pulverizados suministran, en contacto con el agua sola, un líquido de reacción alcalina: lo que implica una separación de potasa. Por otra parte, parece que los minerales constituyentes de las rocas y de las tierras de cultivo representan principalmente las sales de una o más bases enérgicas: K^2O, Na^2O, CaO, MgO, FeO, MnO, etc., combinadas con un ácido débil (alúmino ó ferri-silícico). *Un simple fenómeno de hidrolisis* separa la base y vuelve alcalino el líquido, como acabamos de decir, y esto aun en el seno del agua completamente exenta de gas carbónico.

Hay aquí hechos de que volveremos á ocuparnos más adelante al tratar de las disoluciones de los suelos; estos fenómenos han sido aclarados por Cameron y Bell.

Pero se puede suponer también, conforme á los datos que antes hemos considerado, que la ortosa, en contacto con el gas carbónico, se descompone de la siguiente manera:

$$2Si^3O^8AlK + 2H^2O + CO^2 = 4SiO^2 + CO^3K^2 + Al^2O^9Si^2H^4 \text{ (Caolín)}$$

VII

FENÓMENOS DE DESTRUCCIÓN DE LAS ROCAS CUYO ORIGEN ES DE ORDEN FISIOLÓGICO

Existen fenómenos de orden biológico que contribuyen á la alteración y á la descomposición de las rocas aun de las más compactas. Hemos mencionado anteriormente (pág. 34) la acción de las raíces como capaz de atacar mecánicamente las rocas en las grietas de las cuales poco á poco se introducen. Las raíces segregan ácidos orgánicos que pueden desempeñar, respecto de esto, un papel disolvente de alguna energía. De todos modos, las raíces exhalan siempre, mientras viven, gas carbónico, y se concibe que las superficies minerales que se encuentran en la proximidad de esta fuente gaseosa pueden sufrir más fácilmente fenómenos de descomposición. F. Sestini, ha demostrado, mediante experimentos comparativos, que la vegetación favorecía la desagregación

y la hidratación de las rocas feldespáticas: las raíces se apoderan de las bases (sobre todo de la potasa) y dejan un residuo arcilloso.

Destrucción por los vegetales inferiores.—Se sabe, por otra parte, cuán numerosas son en multitud de rocas, y esto en altitudes en que los verdaderos árboles no pueden desarrollarse, ciertas vegetaciones criptogámicas: algas, musgos, líquenes. Estos organismos, cuando tienen clorofila, fijan el carbono del gas carbónico del aire; su nutrición nitrogenada se efectúa á expensas del amoníaco atmosférico y, probablemente respecto de muchas especies, á expensas del mismo nitrógeno gaseoso. La materia mineral, indispensable para su desarrollo, les es suministrada por la roca donde están implantados. Sus rizoides excretan gas carbónico, tal vez hasta ácidos orgánicos. Al terminar este capítulo volveremos á este asunto á propósito del humus.

Del mismo modo que los vegetales superiores, las plantas inferiores trabajan, pues, en la erosión y en la solubilización de la masa mineral. Las lluvias, el viento, se llevan paulatinamente una parte de esta vegetación, sobre todo cuando las plantas han muerto: se concibe, pues, que las superficies situadas debajo de estas rocas pueden enriquecerse, lentamente sin duda, pero de una manera continua, en los elementos físicos que constituyen la tierra de labor, comprendiendo la materia carbonosa. Esta acción dista mucho de ser despreciable; se efectúa en extensiones considerables y, si está suspendida durante el período frío del año, en cambio es á veces muy activa en la época del calor. Además, en los mismos sitios donde están implantadas las raíces de los vegetales inferiores, se forman poco á poco cavidades en donde puede penetrar el agua atmosférica, produciendo en superficies mucho mayores que antes las acciones disolventes de que anteriormente hemos hablado. Cuando se presentan las heladas, la corteza superficial de la roca se levanta en cierto espesor y ofrece nuevas superficies á la acción corrosiva ulterior del agua y del gas carbónico. En este concepto, las rocas calcáreas algo blandas están particularmente destinadas á sufrir la acción destructiva de los meteoros acuosos.

Destrucción por los microbios.—Otra causa de destrucción de las rocas, y no menos activa, debe atribuirse á los organismos invisibles á simple vista que se agrupan bajo el nombre de *microbios*. Igual que las plantas superiores y los vegetales inferiores, cuyo trabajo de erosión acabamos de mencionar, los microbios no pueden desarrollarse sin el concurso de materias minerales. Estos seres microscópicos, desposeídos de clorofila, encuentran en el polvo orgánico de la atmósfera la fuente del carbono y del nitrógeno que necesitan, y en la materia mineral de la roca donde están diseminados

los elementos inorgánicos que requieren. Del hecho de su pululación resulta, pues, el desmoronamiento de las materias minerales que han tomado de las rocas. En este punto, los microbios nitrificadores son especialmente activos. Müntz (1891) ha demostrado su constante presencia en las rocas, y sobre todo en las partes de las rocas que están en vías de disgregación. Estos microbios, como expondremos á continuación, son capaces, aunque carecen de clorofila, de efectuar, á expensas del gas carbónico del aire, la síntesis de los elementos carbonados que les sirven de alimento y que entran en la composición de sus tejidos. El carbonato amónico, uniformemente difundido en el aire, les suministra el nitrógeno indispensable. Estos organismos trabajan muy activamente en la alteración de las rocas, aun de las más resistentes, gracias á su extremada pequeñez, que les permite introducirse en las menores rendijas: de aquí la producción de este fenómeno de alteración tan notable que transforma los granitos, los esquistos, los calcáreos, en *rocas carcomidas*, esto es, en rocas que finalmente caen reducidas á polvo por la menor causa.

En una palabra, las algas, los líquenes, los musgos, la infinita variedad de microbios, y principalmente los de nitrificación, concurren en una inmensa superficie á la formación de la tierra de labor, de la cual suministran todos los elementos característicos, minerales y orgánicos: son coadyuvantes muy potentes de los fenómenos de orden mecánico y químico examinados antes sobre la génesis de la tierra de labor. Existe también una causa bastante eficaz de transformación continua de los elementos de la tierra de labor, consistente en la acción de ciertos animales, entre los cuales hay que citar en primer término á los *gusanos de tierra*. Diremos de éstos algunas palabras al tratar de la producción del humus.

Fijación del gas carbónico en la corteza terrestre. — Dado el papel de primer orden que hemos atribuído al gas carbónico en la descomposición de las rocas silicatadas, resulta que la atmósfera primitiva que rodeaba nuestro globo debía ser infinitamente más rica en este gas de lo que es actualmente. Por una parte, éste ha sido consumido en las épocas primitivas por los vegetales verdes que han precedido evidentemente á los demás en su aparición, porque sólo ellos pueden utilizarlo como fuente de carbono, y estos vegetales han concentrado este carbono en forma de hulla. Por otra parte, el gas carbónico se ha fijado en forma de carbonato en los productos de descomposición básicos de las rocas feldespáticas. Por consiguiente, se ha inmovilizado, y su proporción inicial forzosamente ha

disminuído de un modo muy notable. Pues bien, como los vegetales verdes de la época actual, de dimensiones mucho menores que las de sus antepasados, trabajan, sin embargo, todavía en empobrecer la atmósfera en gas carbónico, y los fenómenos de desagregación de las rocas, seguidos de la carbonatación de algunos de sus elementos, continúan con toda seguridad aún á nuestra vista, se llega á la consecuencia de que la cantidad total de gas carbónico del aire debería disminuir incesantemente. Pero, todos los fenómenos de combustión, esto es, de oxidación de la materia carbonada, combustiones vivas ó lentas, tienden á restablecer el equilibrio. Es imposible saber hasta qué punto es afectado este equilibrio y decir si la dosis del gas carbónico contenido actualmente en la atmósfera está destinada á mantenerse constante ó no. Todo lo que puede adelantarse respecto de esta cuestión es que las variaciones bruscas de la proporción del gas carbónico aéreo son atenuadas por efecto de un regulador, que es el agua del mar, según expondremos en el próximo capítulo, relativo á la composición de la atmósfera terrestre.

Conociendo el mecanismo general de la destrucción de las rocas, vamos á ver rápidamente la manera especial como se comportan en este sentido las principales.

VIII

MODOS DE DESTRUCCIÓN DE LAS PRINCIPALES ROCAS

Examinemos el modo de destrucción particular de las rocas que más comúnmente se encuentran en la superficie del globo, así como también los productos que resultan: esto nos dará una idea bastante clara de la naturaleza de los terrenos que proceden de tal ó cual masa de rocas.

Se encontrarán en el tomo I del tratado de *Geología agrícola* de Risler pormenores sobre una materia que aquí no podemos más que apuntar.

Rocas primitivas. Granitos.—El granito está compuesto de tres especies minerales principales: cuarzo, feldespato y mica. El *cuarzo* no constituye un elemento de fertilidad, pero ejerce un papel muy importante respecto de las propiedades físicas de los suelos,

á los cuales comunica, según su grado de finura, cualidades de porosidad ó de impermeabilidad. El *feldespato ortosa* da, al descomponerse, arcilla y potasa; la *albita* da sosa; la *oligoclasa* puede suministrar, además, pequeñas cantidades de cal (en forma de silicato ó de carbonato). La *mica* suministra, descomponiéndose, arcilla, así como magnesia, hierro y, según sus variedades, algo de potasa y de sosa. Además, todos los granitos contienen algo de apatito, á veces fosfatos de hierro y de aluminio. El ácido fosfórico, en este último estado, es poco atacable por el agua cargada de gas carbónico. Por último, los granitos contienen frecuentemente sulfuro de hierro cuya oxidación produce ácido sulfúrico, esto es, el elemento *azufre*, en una forma soluble que es indispensable á las plantas.

Los granitos de grano pequeño resisten mejor á la descomposición que los de grano grueso. La desagregación de un granito es tanto más rápida cuanto menos sílice y cuanto más cal y óxido ferroso contiene. Los suelos formados por la destrucción de estos granitos (con oligoclasa, andesina, anortita, labradorita) contienen, además de arcilla, carbonato cálcico, y son más fértiles que los que derivan de un granito de ortosa ó de albita.

Las micas, cuyos elementos son más blandos, presentan grados de alterabilidad que varían con su composición. Las *micas ferromagnésicas* (biotita), de color obscuro, son muy alterables y producen mucha arcilla; las micas *alúminopotásicas* (muscovita) son muy poco alterables y sus escamas se hallan intactas en los productos de desagregación; estas escamas pueden permanecer mucho tiempo en suspensión y no depositarse con la arcilla más que cuando la velocidad del agua disminuye.

La destrucción de las rocas graníticas produce masas minerales de todas dimensiones: desde fragmentos de la roca primitiva inalterados, y á veces voluminosos, hasta las arenas más finas, mezcladas con mica, y las arcillas. Siguiendo la pendiente del suelo, estos fragmentos se detienen en él ó son arrastrados, según sus dimensiones, á distancias mayores ó menores. Al pie de la roca, y en su inmediata proximidad, se puede encontrar un suelo formado por elementos gruesos, muy permeable; más lejos, por el contrario, un suelo formado por arcilla y arena fina, impermeable. Pero lo que caracteriza á los suelos nacidos de la descomposición de las rocas graníticas en general, es el ser esencialmente pobres en ácido fosfórico y en cal. Á veces, estos dos últimos elementos de nutrición serán tan poco abundantes, que el suelo no será capaz de alimentar más que una vegetación mísera.

La *sienita*, en la cual la mica va acompañada o hasta llega á ser reemplazada por la *hornblenda*, silicato cálcico y magnésico, suministra por su descomposición tierras más ricas en cal que las que proceden del granito propiamente dicho.

La *diorita*, roca de feldespato y anfíbol, que contiene á veces oligoclasa y labradorita, es con frecuencia, por esto mismo, bastante

rica en cal, y su descomposición produce suelos mucho más fértiles que aquellos cuya génesis acabamos de examinar; tanto más cuanto la diorita contiene una proporción no despreciable de fosfato tricálcico.

Rocas volcánicas.—En estas rocas, menos bien cristalizadas que las precedentes y conteniendo con mucha frecuencia una masa amorfa, existe, como lo demuestra el cuadro de la página 27, una notable cantidad de fosfato tricálcico y de silicatos á base de cal. Las traquitas, los basaltos, las lavas, suministran, pues, por su descomposición, suelos infinitamente más ricos en materias fertilizantes que los que derivan de rocas eruptivas. Los basaltos, en particular, están formados por silicatos básicos cuya alteración al aire húmedo es bastante rápida. Su riqueza en potasa es escasa; pero, en cambio, están suficientemente provistos de cal. Sufren una descomposición tanto más rápida cuanto más abunda esta última base.

Ciertas aguas, procedentes de terrenos volcánicos de Auvernia, son excepcionalmente ricas en ácido fosfórico. Según Truchot, contienen, por litro, de 0,8 á 1 miligramo de este ácido y 1,4 miligramos aproximadamente de potasa.

Rocas cristalofilinas.—Los *gneis* experimentan una descomposición cuyos productos son idénticos á los de los granitos propiamente dichos. Los gneis de feldespatos cálcicos producen por su alteración silicato de calcio.

Los *micasquistos* no contienen feldespatos; están formados por capas alternadas de cuarzo y mica, y presentan menor resistencia á los agentes atmosféricos que los gneis. Su descomposición origina suelos relativamente ricos en magnesia, pero casi totalmente desprovistos de cal. Si predomina la mica en los micasquistos, la descomposición de éstos es bastante fácil y suministra tierras arcillosas; pero si abunda mucho el cuarzo en la roca primitiva, ésta es muy dura, de difícil descomposición y no da más que suelos improductivos.

Rocas calcáreas.—Se encuentran en muchas formaciones geológicas; son de naturaleza sedimentaria y están casi exclusivamente formadas por carbonato cálcico. Su estructura es muy variable. Cuando son muy duras (mármoles, calcáreos compactos), no son atacadas por el agua cargada de gas carbónico más que con una gran lentitud. Los calcáreos jurásicos, oolíticos, y sobre todo las cretas, son infinitamente más atacables. En todos los casos, el producto del ataque es bicarbonato cálcico, fácilmente difusible, capaz de suministrar de nuevo carbonato cálcico neutro de grano muy fino tan pronto como se desprenda el exceso de gas carbónico que le mantiene en disolución.

La mayoría de las rocas calcáreas contienen siempre elementos extraños, como el carbonato magnésico, cuya forma de disolución

por el gas carbónico ofrece las mismas particularidades que las del carbonato cálcico. Los calcáreos son frecuentemente arenosos. Al lado de la sílice amorfa que se separa de su disolución en el agua carbónica, pueden existir cristales de cuarzo; arena ó cuarzo quedan sin atacar. Muchos calcáreos contienen arcilla, la cual queda después de la disolución del calcáreo; los calcáreos ricos en arcilla constituyen las *margas*. Cuando éstas se emplean como enmiendas, sufren al cabo de cierto número de años una suerte de disolución que elimina el calcáreo. Casi siempre, los calcáreos contienen óxido de hierro que les da color gris, á veces hasta llega á comunicarles un tinte ocráceo. Este óxido de hierro, quedando en libertad con la desaparición del calcáreo, se hidrata y se transforma en limonita. Algunos calcáreos contienen fosfato tricálcico, mucho menos soluble en el agua cargada de gas carbónico que el carbonato cálcico; pero, fuera de algunos casos excepcionales, la dosis de fosfato tricálcico no llega más que á algunas milésimas. Con frecuencia, también contiene el calcáreo un poco de potasa. **Un suelo puramente calcáreo es casi** infecundo, porque las dosis de potasa y de ácido fosfórico que contiene la mayoría de las veces son insuficientes. En conjunto, el calcáreo, que, como veremos á continuación, tan importante es en la economía del suelo, es una roca *soluble* sin descomposición y tanto más soluble cuanto más desmenuzable ó cuanto más preparada ha sido la disgregación por la acción de los agentes mecánicos y físicos.

Lentitud de la formación de la capa de tierra de labor.—Se puede preguntar cuánto tiempo se necesita para la formación de una capa de tierra de labor. Fenómenos de toda naturaleza contribuyen, como hemos dicho, á esta formación, y la capa de tierra de labor contiene, á la vez, elementos minerales y residuos orgánicos.

Se puede, á propósito de esto, recordar las observaciones de Semiatschenski (citado por Ramann: *Bodenkunde*, 3.ª edición, pág. 75, 1911). Sobre ruinas calcáreas, en Austria, se había formado en quinientos ó seiscientos años una capa térrea de 10 centímetros de espesor; en un muro de fortaleza, en Crimea, se formó en seiscientos años una capa del mismo grueso. Los suelos, en la proximidad de estas localidades, tenían: el primero, un espesor de 38 á 40 centímetros; el segundo, un espesor de 65 centímetros. Según esto, la formación de estos suelos habría exigido un tiempo de 2400 á 3600 años.

IX

FORMAS PRINCIPALES DE LOS ELEMENTOS DE LAS ROCAS QUE SE ENCUENTRAN EN EL SUELO

α. **Elementos ácidos.**—SÍLICE Y SILICATOS.—La sílice se halla en el suelo en forma de cuarzo cuyos ángulos son á veces muy vivos y otras más ó menos desgastados: se encuentra también en forma de sílice hidratada (ópalo). Tal vez se debe admitir también su presencia en forma de *sílice gelatinosa*, esto es, amorfa, procedente de la eliminación del agua que antes la había disuelto. La seudosolución que forma la sílice en el agua puede, efectivamente, sometida á diversas acciones de contacto, coagularse: de ahí el origen de esta sílice gelatinosa. Además, la hidrolisis debe ser completa en las soluciones muy diluídas de los silicatos (Graham, Kahlenberg y Lincoln), y la sílice libre afecta entonces el estado coloide.

El suelo contiene, además, una multitud de desechos de silicatos más ó menos alterados, procedentes de la roca inicial que los ha originado. Veremos, á propósito de las disoluciones contenidas en el suelo, que estos silicatos se disuelven con lentitud variable en el agua y constituyen, por algunos de sus elementos, la materia mineral absorbida por las raíces de los vegetales. Pero muchos silicatos están alterados en el suelo: ya sea que esta alteración se haya producido en la roca inicial, ya se haya efectuado ulteriormente por acciones químicas. Así es que los cristales de feldespato ortosa pierden su brillo y se colorean de rojo por efecto de la peroxidación de una pequeña cantidad de óxido ferroso que contenían en su origen. Ciertos cristales experimentan igualmente una caolinización parcial. La *peridota*, silicato magnésico, se hidrata y se transforma en *serpentina*, silicato magnésico hidratado; el óxido ferroso se convierte en óxido férrico y el color del mineral primitivo pasa á amarillo. Los feldespatos plagioclasas se hidratan y forman calcita, zeolitas y arcilla; pueden igualmente perder toda ó parte de la cal y de la sosa y transformarse en caolín. Las láminas de las micas magnésicas (biotita) están rodeadas á veces de una zona más clara (clorita) á causa de la eliminación del hierro; pueden perder la mayor parte de las bases que las constituyen y formar arcillas muy ferruginosas. Se concibe, pues, que la arcilla nunca es pura considerada como un silicato de aluminio hidratado. Casi siempre la acompaña óxido férrico,

así como restos arenosos de toda naturaleza formados por sílice y por fragmentos, á veces extremadamente finos, de los más diversos silicatos.

ÁCIDO FOSFÓRICO Y FOSFATOS.—Este ácido está extremadamente esparcido; pero, de ordinario, no existe en el suelo más que en indicios. Las principales formas minerales que afecta el ácido fosfórico son las de fosfato tricálcico, fosfato férrico, fosfato alumínico, fosfato magnésico. Bajo la influencia de múltiples reacciones que examinaremos á continuación, el fosfato tricálcico, muy poco soluble en el agua cargada de gas carbónico, puede convertirse en fosfato de hierro ó de aluminio por doble descomposición. En esta nueva forma es casi insoluble en el agua y mucho menos soluble en el agua carbónica que los fosfatos de calcio y de magnesio: no parece que las plantas puedan utilizar directamente el ácido fosfórico unido al hierro y al aluminio.

Se suele admitir que la presencia del gas carbónico en el agua facilita considerablemente el ataque de los fosfatos del suelo. Según Schlœsing hijo, esta influencia puede ser sensible cuando el gas carbónico se presenta en el agua sin la cantidad correspondiente de bicarbonato cálcico, pero es nula cuando, con este ácido carbónico, el agua contiene bicarbonato cálcico que la satura de tal manera que no puede disolver más. En todos los casos, y en cualquier forma que estén en el suelo, la solubilidad de los fosfatos es tan escasa y las propiedades absorbentes del suelo se ejercen tan completamente respecto de ellos, que las aguas de infiltración que han atravesado el suelo la mayoría de las veces no contienen más que trazas de los mismos.

La *estructura* de los fosfatos que contiene el suelo no es la misma en todas partes. Cuando las rocas primitivas abandonan, por efecto de fenómenos mecánicos de desmoronamiento, los fosfatos que contienen en cantidades extremadamente variables, éstos afectan una textura cristalina. El fosfato se encuentra entonces en forma de *apatito* y resulta de depósitos formados por las aguas termales: el gas carbónico que lo mantenía en disolución se ha desprendido paulatinamente y el producto ha cristalizado. Es esta una forma de fosfato muy poco atacable por los agentes ordinarios que se hallan en los suelos. Pero, cuanto mayor es el estado de división del apatito más

actúan sobre él los agentes de disolución ó de transformación. El origen probable del fosfato tricálcico parece ser un ataque de ciertos fosfuros por el vapor de agua. Al lado de esta forma cristalina, los fosfatos se encuentran en el estado *amorfo,* mucho más sensibles á la acción de fenómenos de disolución y, por consiguiente, mucho más eficaces en cuanto se refiere á la nutrición de los vegetales. Los fosfatos amorfos, á menudo reunidos en grandes cantidades en gran número de localidades, constituyen nódulos, arenas, cretas fosfatadas. En la capa cretácea es donde se ha formado la mayor acumulación de fosfato tricálcico.

Es posible que, á pesar de su muy escasa solubilidad en el agua cargada de gas carbónico, el fosfato tricálcico haya sido arrastrado á alguna distancia de su yacimiento y se haya depositado, á causa de la pérdida del gas, sobre tal ó cual substancia (carbonato cálcico, por ejemplo) que haya servido de núcleo y de cebo. Tal vez la solución de fosfato tricálcico, á medida que se desprendía el gas carbónico, ha disuelto totalmente el núcleo calcáreo primitivo, el cual ha sido substituído por un núcleo enteramente fosfatado. Sea lo que fuere, el suelo contiene con mucha frecuencia partículas fosfatadas amorfas, de una gran finura, capaces de entrar fácilmente en reacción con ciertos disolventes naturales.

Ácido sulfúrico y sulfatos — Todos los suelos contienen ácido sulfúrico, en forma de sulfato cálcico hidratado por lo común. La solubilidad de esta sal, entre 15 y 20 grados, es de 1 gramo para 388 gramos de agua; 218 partes de agua saturada de gas carbónico disuelven 1 gramo. Las substancias fertilizantes introducidas artificialmente en la tierra de labor pueden llevar al suelo dosis notables de ácido sulfúrico (sulfatos de potasio, de amonio; sulfato cálcico empleado en el enyesado; sulfato magnésico de ciertos abonos potásicos impuros). Los sulfatos son muy móviles en el suelo, gracias á su notable solubilidad. No hablaremos, como se comprende, de ciertos sulfatos que se encuentran más raramente, como el sulfato bárico, el cual es prácticamente insoluble.

Ácido clorhídrico y cloruros. — Apenas hay suelo que no contenga cloruros (de sodio, de potasio). Muchas rocas contienen indicios. A veces se considera que la presencia del cloro en el suelo procede de las aguas marinas pulverizadas por el viento y capaces de ser transportadas tierra adentro, aun á grandes distancias. Cerca de las costas del mar, este transporte es cierto; las hojas de los vegetales que viven en la zona marítima se cubren con frecuencia de una capa, bastante apreciable, de sal marina; esto es lo que ha hecho creer á muchos autores que las cenizas de estas plantas contenían normalmente una fuerte cantidad de esta sal. El papel del cloro en la economía vegetal es, por otra parte, muy obscuro.

β. **Elementos básicos.** — Potasa. — Es, junto con la cal, la base más común que se encuentra en el suelo. Se halla en él en estado de silicatos complejos que aun forman parte de restos de rocas no descompuestos, como también en forma de silicato potásico soluble procedente de la destrucción química de dichos restos. Las soluciones de estos silicatos en el suelo son extremadamente diluídas: deben estar completamente hidrolizadas, esto es, divididas en sílice y base: lo que explica, como hemos dicho antes (pág. 45), la alcalinidad de las aguas que han estado algún tiempo en contacto con el feldespato pulverizado. El ataque de las rocas potásicas por los agentes naturales es muy lento; es más rápido cuando se trata de silicatos zeolíticos. Así, es indispensable añadir con bastante frecuencia al suelo abonos potásicos solubles destinados á alimentar ciertos vegetales (plantas-raíces) especialmente ávidos de este álcali, por más que el análisis químico indica la presencia de cantidades muy notables de potasa en la mayoría de los suelos. Veremos, á propósito de la constitución química de los suelos, cuán difícil es definir las *verdaderas formas* de este álcali, principalmente las que son útiles á las plantas. La presencia del calcáreo, ó más bien la del bicarbonato cálcico, ejerce una marcada influencia en la solubilidad de la potasa contenida en los silicatos.

Sosa. — Esta base acompaña frecuentemente á la potasa en multitud de rocas. Como ésta, se encuentra, ya en estado de silicatos complejos pertenecientes á fragmentos de rocas inalterados (albita, oligoclasa), ya en estado de silicato sódico en solución muy diluída. Muchos vegetales contienen sosa; su papel es bastante obscuro (véase, sobre este punto, nuestra *Química vegetal*).

Cal. — Esta base se halla en el suelo en dos formas principales: la de silicato y la de carbonato. Podríamos repetir aquí lo que hemos dicho poco antes relativamente á la potasa. Ciertos silicatos complejos (anortita, anfíboles, piroxenos) contienen cal, aun no desagregada de manera alguna. En esta forma, la cal puede servir, en teoría, para la nutrición de todos los vegetales. Sin embargo, en los suelos que no contienen más que restos de estos silicatos cálcicos complejos no vegetan más que plantas muy especiales y son impropias para el gran cultivo; por otra parte, la disolución de estos silicatos cálcicos es muy lenta.

No ocurre lo mismo con el carbonato cálcico. Éste se encuentra en multitud de terrenos, en proporciones extremadamente variables y en grados de finura que varían igualmente entre amplios límites.

La presencia de esta forma de la cal imprime al suelo caracteres muy particulares. Todas las plantas del gran cultivo pueden prosperar en los terrenos calcáreos, con la condición, ciertamente, de que la dosis no sea excesiva. Todas las tierras calcáreas pueden transformar el nitrógeno orgánico en nitrógeno nítrico, lo que no ocurre en los suelos desprovistos de carbonato cálcico, llamados *suelos ácidos* (tierras de brezo, landas, turberas, etc.). Además, el calcáreo desempeña un importante papel en el poder absorbente, principalmente respecto de las sales potásicas. Con su presencia mantiene á la arcilla en estado de coagulación y permite así que el agua y el aire circulen libremente. Pero, estas notables propiedades que posee el calcáreo no se ponen de manifiesto más que cuando este elemento está muy dividido. Nos ocuparemos más adelante en este punto capital. Cuando está muy dividido, el calcáreo es muy móvil en el suelo, gracias á su solubilidad en el agua cargada de gas carbónico. Subviene muy fácilmente á las necesidades de los vegetales; está, en efecto, sometido á continuas acciones disolventes, seguidas de reprecipitación, cuando, por una ú otra causa, se desprende el gas carbónico que lo mantenía en disolución.

Hemos mencionado ya (pág. 39) ciertos hechos relativos á la descalcificación del suelo que deben atribuirse á la solubilidad del calcáreo.

En virtud de su fácil descomposición por los ácidos y de la alcalinidad de su base, el carbonato cálcico puede saturar las materias orgánicas de propiedades ácidas que muchos suelos contienen en exceso: el cultivo resulta posible después de un encalado. Hablaremos en otro lugar de la naturaleza y de las propiedades de los terrenos llamados *ácidos*.

Se deduce de lo que antecede que el análisis químico, como veremos más adelante, deberá informarnos sobre las *diferentes formas de la cal* é indicarnos sobre todo qué proporción de este elemento es capaz de entrar en el suelo en combinación con el gas carbónico.

Magnesia. (1) — Está menos esparcida en los suelos que la cal, pero se encuentra en los mismos estados: 1.º, restos de rocas silicatadas magnésicas (micas magnésicas, piroxenos, peridota), á los cuales la planta puede tomar la magnesia que contienen y que parece indispensable á la constitución de alguno de sus órganos; 2.º, carbonato magnésico, raramente puro y generalmente combinado con carbonato cálcico (dolomía). Respecto de las propiedades físicas del suelo, el carbonato magnésico puede desempeñar un papel análogo al carbonato cálcico; pero no podría reemplazar á este últi-

(1) La importancia de la magnesia en las plantas es grande, desde el momento en que se ha encontrado que la clorofila, que desempeña tan notable papel en la asimilación del carbono del anhídrido carbónico del aire por las plantas, es un compuesto magnésico.—C. B.

mo cuando se trata de la nutrición de la planta. Recordemos que el carbonato magnésico es marcadamente más soluble en el agua cargada de gas carbónico que el cálcico.

Óxido de hierro. — No hay suelo que no contenga indicios á lo menos de hierro; éste se halla en forma de silicatos complejos. Las micas, las cloritas, los anfíboles, los piroxenos, siempre son más ó menos ferruginosos; lo mismo ocurre con la arcilla. Los terrenos exclusivamente arenosos contienen frecuentemente hierro en estado de óxido hidratado.

Óxido de manganeso.—Existiendo en casi todos los terrenos con frecuencia en indicios, desempeña un papel capital en la constitución de los fermentos oxidantes.

X

DISCUSIÓN RELATIVA A LA NATURALEZA Y A LA COMPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LAS ROCAS QUE SE ENCUENTRAN EN EL SUELO

Hemos fijado, en las anteriores páginas, el modo de descomposición de las rocas silicatadas haciendo intervenir el agua y el gas carbónico como agentes esenciales de la simplificación de estas rocas. Según esta manera de ver las cosas, los elementos de las rocas serían objeto de un ataque perpetuo, tanto más intenso cuanto menores fuesen sus fragmentos; estos fragmentos serían llamados á desaparecer como constituyentes de la roca original al cabo de un tiempo más ó menos largo. No quedarían, finalmente, como esqueleto del elemento primordial, más que la sílice y el silicato de aluminio. Las diferentes bases, eliminadas de la roca por efecto de este vasto trabajo de descomposición, se encontrarían, ya en forma de silicatos simples, ya en forma de carbonatos, ya en la de óxidos. Hemos puesto de manifiesto de qué manera la observación de los fenómenos naturales hablaba en favor de este género de descomposición, y hemos señalado algunos experimentos que pueden apoyar esta interpretación clásica. Pero hagamos notar que ésta no tiene valor

más que si se admite que los silicatos complejos, que forman la trama de la gran mayoría de las rocas, representan sólo una suerte de agregados originados por la soldadura de muchos silicatos simples.

Persistencia, en la tierra de labor, de especies minerales puras. — Como ya hemos hecho observar (página 51), es posible que no sea únicamente el ácido silícico el que se encuentra en los elementos silicatados. La sílice puede, muy verosímilmente, figurar en los silicatos en forma de *ácido alúmino* ó *ferrisilícico*. Esto nos sirve de transición para exponer otra manera de ver las cosas relativamente á la persistencia en el suelo de especies minerales intactas, tal como han salido de la roca inicial. Esta nueva manera de considerar la estructura mineral de la tierra de labor ha sido ideada por Delage y Lagatu (1905) á consecuencia de una serie de trabajos hechos por estos sabios, trabajos concebidos en el siguiente sentido.

Existe una notable concordancia entre la composición de una tierra determinada y la de la roca ó de las rocas originales. Para estudiar la constitución de la tierra de labor, los citados autores abren en el suelo, hasta la profundidad de 30 centímetros, un agujero de bordes rectangulares, de donde sacan muchos kilogramos de tierra. Se vuelve ésta homogénea removiéndola bien y se echa sobre un tamiz de mallas de 5 centímetros, donde queda después de fuerte zarandeo una parte de guijarros. Luego se echa lo que ha pasado á un segundo tamiz de diez hilos por centímetro. Sobre éste queda, después de sacudirlo, la arena gruesa. Los guijarros y la arena gruesa pueden ser fácilmente observados á simple vista. La *tierra fina* que ha atravesado el segundo tamiz, y que debe ser considerada como la tierra *verdaderamente activa* desde el punto de vista de la vegetación, sólo puede ser estudiada al microscopio. Esta tierra fina, por medio de un procedimiento que nos llevaría demasiado tiempo exponer aquí, se aglomera y corta luego en láminas delgadas que tienen aproximadamente 1/100 de milímetro de espesor, como se hace con las muestras de las rocas macizas. Se examinan estas láminas al microscopio, provisto de aparato de polarización, empleando luz de rayos paralelos.

Pues bien, en vez de hallar en esta tierra fina elementos distintos de la roca inicial, ó más ó menos fuertemente atacados por efecto de los procesos anteriormente indicados, Delage y Lagatu no

encuentran más que *especies minerales de una perfecta pureza, esto es, en el mismo estado en que se hallan en la roca de origen*: y esto en la gran mayoría de los casos.

Entre estos minerales, muchos han sufrido, sin duda, *epigenias*, ó, en otros términos, descomposiciones; pero las mismas epigenias se encuentran en los mismos minerales que forman parte de las rocas. Es posible que estas alteraciones hayan continuado efectuándose en el seno de la tierra, pero no son exclusivas de la tierra de labor. De aquí la consecuencia que *no existiría en la tierra de labor ninguna especie mineral en verdadera descomposición*.

En cuanto á la arcilla, es una mezcla muy compleja que contiene una multitud de especies minerales. Los elementos de esta arcilla forman, en las preparaciones obtenidas por los autores antes citados, una suerte de red de mallas irregulares, ocupadas exactamente por minerales cuya determinación es posible, aunque difícil á causa de su pequeñez.

Para explicar cómo los vegetales que se desarrollan en el suelo son capaces de tomar de él las materias indispensables para su existencia, materias que no pueden prestarse á la absorción más que disueltas, Delage y Lagatu admiten que los minerales constituyentes de la tierra de labor *se disuelven pura y simplemente en el agua*. Esta disolución es muy lenta, sin duda, pero, quitando el agua paulatinamente y con muy variable rapidez la totalidad de los elementos de una especie mineral dada, se comprende que esta especie permanece pura hasta que haya desaparecido integralmente. Entre las diversas disoluciones que originan los minerales tan diversos que componen la tierra de labor, se produce una serie de dobles descomposiciones. Las substancias nacidas de éstas constituyen, en realidad, el medio líquido nutritivo en el cual las raíces de las plantas toman los elementos salinos que son indispensables para su nutrición. Esta idea de la *persistencia integral* de las especies minerales y de su disolución progresiva en el agua ha sido adoptada en estos últimos años por muchos agrónomos americanos.

Dejemos por un momento á un lado cuanto se refiera á la naturaleza y á la composición de las disoluciones contenidas en la tierra de labor. Volveremos á encontrar esta materia á propósito de la constitución química del suelo; ocupémonos sólo en examinar hasta qué punto esta opinión está bien fundada.

Objeciones á esta opinión. — *A priori*, las objeciones deben ser numerosas; las ha formulado principalmente Cayeux.

En realidad, todas las tierras de labor pueden reducirse á dos tipos: *tierras formadas donde se hallan; tierras transportadas á una distancia mayor ó menor del punto donde se formaron*. Pues bien, en el primer grupo, los fenómenos

de alteración y de descomposición forman la regla general. Si se estudian los terrenos nacidos de rocas eruptivas, se pueden seguir los progresos de la alteración desde *la roca inicial intacta situada en el interior hasta la capa superficial no arrastrada por las aguas y que es utilizada como tierra de labor*. Este fenómeno de alteración es, por otra parte, de una extremada lentitud. Ya que la observación muestra la existencia de elementos alterados en el caso de una tierra formada en su sitio de origen, es imposible admitir que los terrenos de transporte, cuyo origen debe buscarse en la destrucción de las mismas rocas, no presenten ya los fenómenos de alteración señalados en las tierras formadas donde se hallan.

Es preciso, en realidad, distinguir en la tierra de labor tres categorías de minerales:

1.° Los que no sufren *alteración alguna* y que deben encontrarse en la tierra, si no con la forma cristalina perfecta que tenían en las rocas, á lo menos con la misma composición química: cuarzo, zircona (silicato de zirconio), turmalina; 2.°, aquellos que pueden *disolverse*, esto es, *desaparecer integralmente* por la acción de los disolventes naturales (agua), tales como: apatito, yeso, calcita, creta, sal marina; 3.°, aquellos que manifiestan señales evidentes de alteración: feldespatos diversos, micas, etc. Estos últimos están frecuentemente epigenizados, esto es, en vías de descomposición ó más bien de *substitución* por ciertos elementos nuevos, de los que entraban originariamente en su composición. Es éste un hecho conocido desde hace mucho tiempo y sobre él, como hemos dicho antes, Delage y Lagatu han llamado nuevamente la atención. Posible es que los mismos minerales se encuentren en la roca inicial con las mismas epigenias, y que éstas no continúen en la tierra de labor formada por estos mismos minerales más ó menos divididos; no es menos cierto, también, que no se trata aquí de especies *puras*. Una mica, epigenizada por la clorita, no es una mica pura, y es difícil admitir *a priori* que la acción disolvente del agua se ejercerá de la misma manera sobre la mica pura que sobre la mica alterada. Pero dejemos de momento á un lado el papel del disolvente; volveremos á él más adelante.

La epigenia, como observa Cayeux, no es más que una descomposición respecto de los minerales que no se disuelven directamente (los que hemos clasificado antes en la tercera categoría). Los minerales secundarios que reemplazan por substitución al mineral primitivo reconocen tres orígenes: α. La materia de estos minerales secundarios es suministrada exclusivamente por el mineral primitivo. β. Las aguas que circulan en las rocas transportan en solución substancias

que originan minerales secundarios. γ. Estos no proceden más que de substancias disueltas llevadas por las aguas, y el mineral primitivo no cede ninguna parte de su materia.

Pues bien, un mineral que sufre la epigenia cede forzosamente una parte de su substancia: el mineral secundario que lo invade difiere del mineral primitivo por la naturaleza y las proporciones de las bases que contiene. Bastarán dos ejemplos, tomados de Cayeux, para enseñar el mecanismo de esta *substitución*. La ortosa, silicato de aluminio y de potasio, cuya limpidez está alterada por partículas de arcilla secundaria, ha perdido una parte de su potasa. Si la epigenia es total, una cantidad de potasa, que llega á 14 por 100 del peso del mineral primitivo, es puesta en libertad. La epigenia de la biotita por la clorita deja libres diversas bases y, sobre todo, la potasa (á lo más 11 por 100).

Resulta de esto que, si se quiere apreciar el estado de conservación de los elementos minerales de la tierra de labor, es preciso prescindir de las dos primeras categorías que antes hemos citado: minerales inalterables, minerales que desaparecen completamente por disolución sin dejar vestigios de alteración; y no hay que retener más que los de la tercera categoría, muy numerosos, que se descomponen por epigenia y abandonan sus productos de alteración. Cayeux formula, pues, la siguiente proposición, tal como la hemos indicado en primer término: «*la presencia de materiales alterados en grados muy diversos y en proporciones muy variables es la regla absolutamente general*». El mismo autor señala, á este propósito, un hecho que puede inducir á error en el análisis microscópico de las rocas y, en consecuencia, de las tierras de labor. Este hecho se refiere á la posible presencia de *minerales secundarios*. Se hallan frecuentemente, en efecto, en una roca eruptiva en vías de alteración, feldespatos antiguos cuya descomposición produce en el mismo sitio feldespatos nuevos. Estas dos categorías de elementos feldespáticos pueden existir en una misma tierra de labor. Estos feldespatos muy puros, derivados de feldespatos antiguos, son la señal de *una descomposición muy avanzada:* lo que parece una paradoja. En realidad, estos feldespatos secundarios muy puros no se forman á expensas de los feldespatos antiguos más *que á causa de ponerse en libertad una base:* un feldespato cálcicosódico, por ejemplo, es substituído por un feldespato *exclusivamente sódico*.

Los fenómenos de epigenia continúan en la tierra de labor.—Esta demostración resulta, según Bieler-Chatelan, de las siguientes observaciones. El vidrio, expuesto á la humedad, se recubre de irisaciones producidas por finas láminas de silicatos insolubles que quedan, mientras que los silicatos alcalinos solubles son arrastrados por el agua. Este último autor recuerda el experimento de Daubrée en el cual se ve que el ataque del vidrio, producido por el agua recalentada, conduce á un silicato cálcico fibroso análogo á la

wollastonita. Vidrios naturales, como la obsidiana, presentan igualmente fenómenos de irisación.

¿Se disuelven los elementos de una roca tal como son? —De todas las conclusiones enunciadas por Delage y Lagatu, ésta es, indudablemente, la más difícil de admitir si se toma al pie de la letra. Decir que un cuerpo se disuelve, por ejemplo en el agua, es decir que, con una cantidad suficiente de este líquido, *el cuerpo desaparece íntegramente sin cambiar de composición* y que, si se evapora luego el disolvente, se encontrarán los elementos del cuerpo disuelto en las mismas proporciones que tenían en el sólido primitivo. Pues cuando se trata de silicatos tan complejos como los que forman parte de las rocas, y que se hallan luego en la tierra de labor, ¿puede decirse *a priori* que su disolución integral en el agua es posible sin que haya, en ningún momento, algún cambio en la composición del sólido que está en vías de desaparecer? Esta afirmación no está apoyada hasta ahora por ningún experimento que tenga valor. Delage y Lagatu, como muchos agrónomos americanos que les siguen, admiten, como consecuencia de los trabajos de Schlœsing hijo, que todos los suelos contienen disoluciones de elementos minerales de los cuales las plantas toman directamente su alimento; no hay duda de que estas disoluciones son extremadamente diluídas, pero, á medida que se efectúa la absorción, vuelven á regenerarse continuamente. Parece que esto está demostrado, y nos explicaremos respecto de este punto al tratar de la constitución química de los suelos. Sin embargo, por una generalización prematura, los citados autores parecen deducir de lo dicho que *todos los elementos de una roca*, cualquiera que sea su naturaleza, se encuentran en disolución en las mismas proporciones que en la roca inicial que ha sido objeto de esta disolución. Todos los hechos conocidos, y son muy numerosos, hablan contra este parecer de un modo absoluto. Algunas palabras nada más sobre este punto.

La acción disolvente del agua va siempre acompañada de una acción destructiva.—Hemos indicado antes (pág. 43) algunos experimentos en los cuales se hace actuar sobre fragmentos ó sobre polvo de rocas, el agua sola ó el agua cargada de gas carbónico. Si se ha observado siempre que los álcalis, especialmente, entraban en disolución en cantidades que con facilidad pueden determinarse, no ocurre lo mismo con otros elementos cuya presencia puede ser reconocida cualitativamente, pero cuyo peso es difícil de apreciar, dada su pequeñez. Sin duda, prolongando bastante tiempo el contacto de la roca desmenuzada con el disolvente, se obtendría un líquido más cargado de elementos disueltos; pero los álcalis solos serían los dominantes. Daubrée, en el experimento de que hemos hablado anteriormente, ha encontrado que 3 kilogramos de feldespato ortosa habían cedido al agua, al cabo de ciento noventa y dos horas de con-

tinuo movimiento: 2,52 gramos de potasa, 0,03 gramos de alúmina y 0,02 gramos de sílice. Es superfluo hacer observar que no puede tratarse aquí de una disolución en el sentido exacto de la palabra, porque, siendo la fórmula de la ortosa K^2O. Al^2O^3. $6SiO^2$, que corresponde á SiO^2=64,86 por 100, Al^2O^3=18,28 por 100 y K^2O= 16,86 por 100, se deberían encontrar en disolución cantidades de alúmina, y sobre todo de sílice, superiores á las encontradas respecto de la potasa en el experimento de Daubrée; y no es así.

Los muchos ensayos hechos en el mismo orden de ideas, ensayos relativos á supuestas disoluciones, demuestran que el agua se ha apoderado efectivamente de ciertas substancias, y aun de todas, pero en proporciones que no guardan relación con la composición del mineral inicial. Cuando se trata de minerales más solubles que la sílice ó la alúmina, existen aún notables diferencias en la manera como el agua se lleva sus componentes.

En cuanto al ejemplo, que se pone á veces, de las aguas minerales ó de ciertas aguas que contienen frecuentemente muchos gramos de substancias salinas disueltas, se puede considerar que demuestra de una manera irrefutable que existe *descomposición de las rocas seguida de disolución y no primitiva disolución:* todas estas aguas no contienen más que indicios de alúmina, mientras que á menudo son relativamente ricas en sales de potasio, de sodio, de calcio. Sin embargo, han atravesado muy frecuentemente terrenos donde abunda la sílice combinada. Citemos aún el curioso caso del granito de Vire estudiado por A. Gautier (1901). Un kilogramo de este granito es lixiviado metódicamente con 7 litros de agua fría. La solución, neutra á los reactivos coloreados, es evaporada. Durante la concentración se observa que el gas carbónico del aire precipita cierta cantidad de sílice y que el líquido, que se vuelve ligeramente alcalino, contiene vestigios de carbonato sódico. El residuo de la evaporación á sequedad contiene sosa é indicios de potasa (y, sin embargo, los feldespatos de este granito son muy ricos en esta última base). El agua ha disuelto igualmente algo de sulfato y de carbonato cálcicos, indicios de magnesia, de hierro y de ácido fosfórico. Este ejemplo demuestra claramente que no puede tratarse aquí tampoco de una verdadera disolución de la roca por el agua en el sentido que en química se da á esta palabra.

Por otra parte, puede ocurrir que un elemento, alcalino por ejemplo, puesto en libertad por la acción del agua, pueda nuevamente reaccionar sobre la roca primitiva despojada de este álcali, y en cierta medida regenerarla. En efecto, según Cosyns, se restituye al silicato de aluminio una parte de su álcali agitándolo con una solución débil de potasa. La reacción es, pues, reversible, y si un agua neutra ó ácida puede caolinizar el feldespato, inversamente una solución alcalina puede feldespatizar la caolinita. En cuanto á los minerales solubles sin descomposición (segunda categoría de Cayeux), pueden desaparecer enteramente y *tal como son* por la acción del

agua; éste es el caso del apatito, que, según hemos indicado antes, suministra una solución de fosfato tricálcico en la cual el ácido fosfórico y la cal se hallan en las mismas proporciones que en el mineral inicial. De todos modos, se ha indicado que el fosfato tricálcico del apatito $(PO^4)^2Ca^3$ parece descomponerse á veces en cal y fostato bicálcico PO^4CaH.

En resumen, la palabra *disolución* empleada á propósito del paso al agua de los elementos ácidos ó básicos de las rocas, es, en el caso presente, de uso absolutamento incorrecto. Si cada elemento de un mineral determinado se disuelve, parece que lo hace según un coeficiente de solubilidad propio. En la pretendida disolución de tal ó cual silicato, nunca se encuentran en los líquidos los elementos de las rocas en las mismas proporciones que tenían en la roca primitiva, tanto si la disolución se ha efectuado con ó sin el concurso del gas carbónico, como si ha sido á la presión ordinaria ó á una presión más elevada. Lo que debe admitirse, á lo menos en el estado actual de la cuestión, es la *descomposición*, es decir, la hidratación, después la separación por la acción del agua que actúa primero como agente químico de tal ó cual elemento de la roca (elementos básicos y sobre todo alcalinos), luego *disolución* de estos elementos según su coeficiente de solubilidad, que debe ser diferente del que dará el agua pura. En efecto, esta disolución se ha efectuado, en las condiciones naturales, en presencia de agua que contiene muchas substancias: se comprende, pues, que los fenómenos de simple disolución vayan acompañados, casi en seguida, de fenómenos de doble descomposición. Tal es el sentido exacto de la naturaleza de las reacciones que ocurren entre el agua y las partículas minerales de las rocas constituyentes de la tierra de labor.

Probable mecanismo de los fenómenos de disolución. — Vamos á emplear, en este párrafo, algunas fórmulas esquemáticas que nos parecen explicar con bastante exactitud la acción del agua sobre los silicatos. Estas concepciones teóricas podrán servir para resumir los diferentes puntos que hemos desarrollado anteriormente; ya sea que se admita la manera clásica de interpretar los fenómenos de

descomposición de las rocas, ya sea que se adopten las recientes ideas sobre la estructura mineral de la tierra de labor que hemos indicado últimamente. No conviene dar á estas fórmulas una importancia exagerada; no constituyen más que un medio cómodo de explicar el mecanismo de la génesis de las disoluciones del suelo y se adaptan bastante bien á las observaciones corrientes. Esta manera de interpretar los hechos, por otra parte, ha sido empleada ya en muchas formas por diversos autores; pero nunca se repetirá demasiado que ninguna de las fórmulas de constitución de los silicatos propuestas hasta ahora, representa de una manera perfecta las diferentes modalidades de este grupo tan complejo de compuestos químicos.

El agua, según lo que hemos dicho, actúa sobre las partículas de las rocas como agente de hidratación, luego de descomposición; su acción disolvente se ejerce en seguida sobre las bases que ha puesto en libertad. Se puede representar este primer efecto de hidrolisis empleando las fórmulas de constitución de los silicatos que hemos mencionado antes (pág. 51) y que permiten explicar de una manera bastante verosímil, por una parte la naturaleza del ataque de los elementos silicatados por el agua y, por otra, la formación de la arcilla considerada como un silicato hidratado de aluminio.

La fórmula de la ortosa $K^2O.Al^2O^3.6SiO^2$, dividida por 2, puede escribirse, hemos dicho: $[KAl]Si^3O^8$, y este silicato sería la sal monopotásica de un ácido *alúminosilícico* $(H)AlSi^3O^8$. El ataque de este mineral por el agua eliminaría el potasio en forma de potasa, poniéndose en libertad el ácido alúminosilícico:

$$KAlSi^3O^8 + H^2O = KOH + HAlSi^3O^8$$

Este último ácido, inestable, se desdoblaría en sílice y un ácido $HAlSiO^4$, el cual, por hidratación, formaría caolín:

$$2HAlSiO^4 + H^2O = Al^2O^3.2SiO^2.2H^2O \text{ (caolín)}$$

Se pueden concebir para el ácido $HAlSiO^4$ y para el caolín las siguientes fórmulas de constitución (Glinka):

$$2\left[O=Si\langle{}^{O}_{O}\rangle Al.OH\right] + H_2O = \begin{matrix} HO-Si\langle{}^{O}_{O}\rangle Al.OH \\ | \\ O \\ | \\ HO-Si\langle{}^{O}_{O}\rangle Al.OH \end{matrix}$$

Caolín

El caolín tendrá, pues, carácter ácido, á causa de la presencia de cuatro grupos hidróxilos (OH), de los cuales dos están unidos al silicio y dos al aluminio. Tendremos ocasión de volver á ocuparnos en este carácter ácido del caolín para explicar ulteriormente una de las causas del poder absorbente del suelo respecto de las bases.

Notemos que el ácido $HAlSiO^4$, monobásico, puede ser considerado como el *esqueleto* de un gran número de silicatos. Ejemplos:

La *anortita:* $CaO\ Al^2O^3 . 2SiO^2$, se escribirá: $Ca(AlSiO^4)^2$: la *labradorita:* $CaO. Al^2O^3 . 3SiO^2$, se escribirá: $Ca(AlSiO^4)^2 + SiO^2$; la *oligoclasa:* $Na^2O. Al^2O^3 . 5SiO^2$, se escribirá: $(Na\ AlSiO^4)^2 + 2SiO^2$, etc. Está permitido, pues, considerar á todos los silicatos como sales potásicas, sódicas, cálcicas, magnésicas, ferrosas, etc., del ácido $HAlSiO^4$. La acción del agua sobre un silicato se limitará, en consecuencia, á separar con mayor ó menor velocidad, por hidrolisis. la base ó las bases alcalinas de los silicatos alcalinotérreos de estas sales complejas y á poner en libertad, según los casos, cierto número de moléculas de sílice. Pues esto es exactamente lo que se observa cuando se estudia la acción del agua sobre los minerales silicatados: este líquido disuelve proporciones, á veces dosificables, variables con el tiempo de contacto, de potasa, sosa, cal, magnesia, con separación de sílice, pero no toca á la alúmina, porque ésta forma parte integrante del radical del ácido complejo $HAlSiO^4$. Por la acción del agua, este ácido simplemente se hidrata y engendra la arcilla, como antes hemos dicho. Este ácido, hipotético sin duda, parece ser extremadamente poco soluble en el agua: de ahí la presencia de indicios de alúmina en los líquidos que han estado en contacto, aun prolongado, con silicatos pulverizados. El aluminio puede, por lo demás, ser reemplazado parcialmente, de acuerdo con lo observado, por el hierro: lo que explica la coloración gris de la mayoría de las arcillas y su mayor ó menor riqueza en hierro (férrico).

En resumen, existirían tres fases sucesivas en la acción del agua sobre un silicato: 1.º *un estado de hidrolisis,* en el cual las bases son separadas del ácido alúminosilícico. Éste queda libre y con frecuencia va acompañado de cierta cantidad de sílice; 2.º *una hidratación,* esto es, la unión del agua con el ácido alúminosilícico, y formación subsiguiente de arcilla; 3.º *una disolución* de las bases que la hidrolisis ha puesto en libertad: *tal es el origen de las disoluciones del suelo.* Estas bases, por otra parte, pueden sufrir una posterior carbonatación, originándose calcáreos y dolomías.

XI

PRESENCIA Y ORIGEN DEL HUMUS EN EL SUELO

Un suelo, cualesquiera que sean su naturaleza y su composición mineral, contiene siempre cierta cantidad de *materia orgánica*, esto es, de una materia procedente de la vida. La proporción de esta materia es extremadamente variable de un terreno á otro, pero su ubicuidad puede demostrarse fácilmente. No existen, en efecto, tierras de labor, arenas estériles y hasta superficies de rocas, que no den, cuando se calcina una pequeña cantidad de las mismas, desprendimiento de gas carbónico, á veces sin duda muy escaso. Si se efectúa esta calcinación en un recipiente cerrado, mezclando previamente la substancia con un poco de cal sodada, se desprende siempre amoníaco: la materia orgánica existente en el suelo ó en la superficie de una roca contiene, pues, al lado del carbono, cierta proporción de nitrógeno.

El *origen* de esta materia debe buscarse en los restos animales y vegetales (véase antes en la pág. 3). Muy á menudo pierde pronto su estructura y su aspecto primitivos, ya sea que sufra, á lo menos en algunos de sus constituyentes, una oxidación más ó menos profunda, gracias á la presencia del oxígeno del aire con el cual está en contacto, ya sea que sufra fenómenos especiales de descomposición fuera de la acción del aire ó en tales condiciones que el aire penetre difícilmente.

Formación de la tierra vegetal.—La materia mineral se organiza, si así puede decirse, con una gran rapidez. Hemos citado antes pruebas concluyentes de ello; pero el hecho puede demostrarse de una manera, hasta cierto punto, sintética.

Tomemos algunos kilogramos de una tierra cualquiera y sometámoslos á una elevada temperatura, capaz de destruir todo vestigio de elementos organizados, todo ser vivo y todo compuesto nitrogenado. Expongamos esta tierra calcinada al libre contacto con el aire. Al cabo de un tiempo que variará de algunos días á algunos meses, nos será fácil comprobar que la superficie de esta tierra ha sido inva-

dida por vegetaciones criptogámicas (algas) y que está habitada por numerosas especies de bacterias llevadas allá con el polvo de la atmósfera. He aquí un primer estreno de organización del suelo respecto de sostener vegetales. Á las vegetaciones inferiores suceden pronto plantas superiores cuyas semillas, á veces muy ligeras y especialmente apropiadas para el transporte (Compuestas), son llevadas consigo por las corrientes atmosféricas. Los primeros de estos vegetales (algas verdes) fijan á la vez el carbono del ácido carbónico y el nitrógeno gaseoso del aire en virtud de una simbiosis que contraen con bacterias específicas que continuamente flotan en la atmósfera. La materia orgánica vegetal aparece en el suelo por primera vez. La muerte de las plantas que la han constituído en su totalidad engendra un humus, aun poco abundante y poco rico, sin duda, pero cuyo peso aumenta después por efecto de la acumulación de otros vegetales parecidos. De manera que, al cabo de cierto tiempo, una planta superior, cuya semilla haya ido á parar casualmente á este medio, encontrará suficiente cantidad de materia nitrogenada para á su vez desarrollarse. Su masa orgánica, mayor que la de las vegetaciones criptogámicas que la han precedido, producirá una cantidad ya importante de humus.

Parece, pues, que ciertos vegetales inferiores, con tal que tengan clorofila y sean capaces de fijar el nitrógeno gaseoso de la atmósfera ó de absorber los indicios de amoníaco que ésta contiene, deben ser considerados como los primeros artesanos que elaboran la *tierra vegetal*, esto es, la mezcla compleja de materia mineral y de materia orgánica á que damos este nombre. En consecuencia, son los seres inferiores, microbios, hongos, algas, los que preparan á las plantas superiores el medio en que éstas podrán encontrar suficiente cantidad de substancias alimenticias: tal ha sido, probablemente, la primera etapa del desarrollo de los vegetales en la superficie del globo, considerado, al principio, como un medio exclusivamente mineral.

Una observación cotidiana nos enseña, por otra parte, que cuando se pone al descubierto, por efecto de excavaciones, arena, arcilla, etc., en una palabra, una masa mineral muy pobre en elementos orgánicos, y especialmente en nitrógeno, esta masa poco á poco se recubre de una flora á veces muy variada.

La mayor parte de la materia orgánica que contiene un suelo no cultivado procede, pues, de vegetales que se han desarrollado espontáneamente en su superficie. Después de muertos, estos vegetales se disgregan, sus restos se esparcen á una y otra parte y su masa orgánica, formada por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, se mezcla poco á poco é íntimamente con la materia del suelo. Este *elemento orgánico* de los suelos no sólo interesa estudiarlo en cuanto á su modo de formación y á las múltiples variaciones que sufre lentamente en el medio en que se encuentra incorporado después de haber pertenecido á un organismo viviente, sino que tiene también una importancia de primer orden respecto de las propiedades físicas de

los suelos, como expondremos ulteriormente. Además, es la fuente continua del gas carbónico incluído en el suelo, y este gas desempeña un papel que nos falta estudiar de más cerca en otro capítulo. El *nitrógeno orgánico* es la fuente del ácido nítrico, forma esencialmente difusible á la cual un considerable número de vegetales toma su nitrógeno.

Imposible es determinar el *primer* origen de la materia nitrogenada. Que la atmósfera haya estado en épocas remotas mucho más cargada de gas carbónico que actualmente, es un hecho que hoy parece generalmente admitido y que permite explicar la presencia, en aquellas épocas, de vegetales de dimensiones gigantescas, de los cuales los yacimientos de hulla contienen aún hermosos ejemplares. Pero ¿de dónde procedía el nitrógeno de que estos vegetales se han apoderado? ¿Es el *nitrógeno libre* quien les ha proporcionado este elemento, como lo proporciona á ciertas categorías de plantas, por ejemplo, las leguminosas, ó ciertas algas verdes? ¿Es el nitrógeno amoniacal el que debe ser considerado como la primera fuente del nitrógeno orgánico de estos vegetales? O bien, ¿existían en el suelo *nitruros* capaces de ser asimilados por ellos? Se comprende que no se puede dar ninguna respuesta satisfactoria á estas preguntas.

Al revés de la materia mineral que, á causa de las transformaciones que sufre en el suelo, cede á las plantas una parte de su propia substancia, la materia orgánica del suelo, generalmente á lo menos, no aprovecha directamente á los vegetales provistos de clorofila en la misma forma que posee: no les suministra más que los productos de su total destrucción, gas carbónico y amoníaco. Sin embargo, muchos vegetales, inferiores ó superiores, desprovistos de clorofila, le toman directamente su carbono y su nitrógeno en una forma compleja que no podría precisarse actualmente. Desempeña aquí el mismo papel de materia nutritiva que los elementos minerales procedentes de las rocas. Ciertos suelos, agotados por el cultivo, no recobran su primitiva fertilidad más que si, al aplicar abonos salinos apropiados, se añaden *abonos orgánicos*, esto es, materias que contienen carbono y nitrógeno en forma condensada. Sería posible, pues, como hacen presentir algunos experimentos y ciertas observaciones, que los abonos orgánicos no obran solamente en un sentido favorable á la vegetación por sus productos de descomposición, gas carbónico y amoníaco, sino que pueden ser absorbidos *tal como son*, á lo menos respecto de alguno de sus componentes, por los vegetales provistos de clorofila. Se ve, pues, la gran importancia que tiene el estudio de la presencia de la materia orgánica en el suelo y de las múltiples transformaciones de orden químico y microbiano que sufre en el medio á que está incorporada, como también el conocimiento del papel que desempeña respecto de los otros componentes de la tierra de labor. Examinaremos los diferentes puntos que acabamos de mencionar más adelante, á propósito de la constitución química de la tierra de labor y de los fenómenos de muy diverso orden que depen-

den de la actividad de los microorganismos que siempre existen en el suelo. (Véanse los capítulos VIII y XI.)

En las páginas precedentes hemos analizado los fenómenos de alteración de las rocas que conducen á la formación de la tierra de labor. Conviene ahora definir, desde el punto de vista físico, químico y fisiológico, cuáles son las propiedades de esta masa en la que debe encontrar la planta todos los elementos indispensables para su evolución. Este será el objeto de los capítulos siguientes.

Pero, antes, es necesario decir algunas palabras de la atmósfera gaseosa que rodea la tierra y que se pone en contacto con sus menores partículas hasta una profundidad bastante grande. Existen relaciones tan íntimas entre esta atmósfera y el suelo, que hemos de buscar en qué proporciones contiene el aire los elementos gaseosos que actúan, á la vez, sobre las substancias minerales cuyas transformaciones acabamos de estudiar y sobre la planta que se desarrolla en este medio sólido.



CAPÍTULO III

ESTUDIO DE LOS GASES DE LA ATMÓSFERA Y DE LAS AGUAS METEÓRICAS

Elementos gaseosos de la atmósfera. — Gas carbónico y sus variaciones. — Circulación del gas carbónico en la superficie del globo. — Amoníaco. — Ácido nítrico. — Ozono. — Aguas meteóricas; su riqueza en principios fertilizantes.

Elementos gaseosos de la atmósfera. — Estudiaremos sumariamente, en este capítulo, los componentes gaseosos de la atmósfera, así como la composición de las aguas meteóricas sólo desde el punto de vista de los elementos de fertilidad que pueden contener. Por lo que se refiere á las cantidades de agua que caen anualmente sobre una determinada superficie de terreno y el papel de este agente en el suelo, nos ocuparemos de estos temas ulteriormente (1).

La *altura* de la atmósfera no es conocida con exactitud. Ciertas consideraciones, sobre las cuales no podemos extendernos, permiten fijar esta altura en unos 300 kilómetros. La mayor parte de los elementos de la atmósfera desempeñan un papel extremadamente importante en la economía del globo: su acción se hace sentir sobre el suelo y sobre las plantas que en él vegetan. Los elementos *constantes* de la atmósfera son: el *oxígeno*, el *nitrógeno* y el *argón*. Según

(1) Entre las numerosas obras ó memorias dedicadas al estudio de la atmósfera, señalaremos el librito de H. Henriet: *Les gaz de l'atmosphère (Encyclopédie Léauté)*, que constituye un buen resumen del estado actual de la cuestión.

Leduc (1896), la composición del aire (1) en estos elementos sería la siguiente:

	Nitrógeno	Oxígeno	Argón
En peso.	75,50	23,20	1
En volumen. . . .	78,06	21,00	0,94

Los elementos *variables* son muchos y, sobre todo, nos proponemos hacer aquí el estudio de algunos de ellos á causa de su importancia en los fenómenos de la vegetación. Estos elementos son: el *gas carbónico*, el *amoníaco*, el *vapor de agua*, el *ácido nítrico*, el *ozono*, el *óxido de carbono*, el *hidrógeno*.

Existen, además, en la atmósfera gases muy raros, descubiertos en estos últimos años: neón, cripton, xenón, helio. No hablaremos de ellos. Digamos sólo que, según Claude (1909), en un millón de partes de aire habría en volumen: 15 partes de neón, 5 de helio y menos de 1 parte de hidrógeno.

Recordemos brevemente el papel de los gases más importantes.

El *oxígeno* actúa sobre ciertos elementos minerales del suelo como oxidante directo: convierte, por ejemplo, el óxido ferroso en óxido férrico. Por otra parte, es el agente más activo de la mineralización de los restos orgánicos que siempre contiene la tierra: el término final de esta destrucción es el ácido carbónico. Respecto de las plantas, el papel del oxígeno no es menos importante, es el agente de todas las combustiones lentas que se efectúan en el vegetal, combustiones que conducen, ya á la producción de ácido carbónico, ya á la de cuerpos menos ricos en oxígeno que este último.

El *nitrógeno*, considerado durante largo tiempo como un gas dotado de una notable inercia respecto del suelo y de los vegetales, es continuamente fijado por la tierra de labor, gracias á la presencia en ésta de microorganismos especiales, como diremos á continuación. Ciertas plantas verdes (leguminosas, algas), pueden también apoderarse del mismo de un modo directo. Inversamente, los fenómenos de combustión rápida y algunos fenómenos de combustión lenta

(1) Entre los trabajos antiguos relativos á la composición del aire, merecen citarse los de Antonio de Martí y Franquès, consignados en una Memoria presentada á la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona en 1790, *sobre los varios métodos de medir la cantidad de aire vital de la atmósfera*. El autor dice haber encontrado constantemente en el aire 79 partes de *mofeta* (nitrógeno) y 21 partes de *aire vital* (oxígeno). Como en aquella época no se conocía el argón, resulta que estos datos concuerdan con los modernos. La Memoria de Martí fué publicada en el *Memorial Literario de Madrid de 1795*.—C. B.

(putrefacción), cuando se efectúan en los tejidos vegetales, devuelven á la atmósfera todo ó parte del nitrógeno que contenían las materias nitrogenadas complejas que forman la trama de sus tejidos.

El *gas carbónico,* que se halla ordinariamente en la atmósfera en volumen incomparablemente menor que el del nitrógeno y el del oxígeno, es la fuente de carbono de que se nutren las plantas verdes. Este gas se descompone sin cesar: la planta fija el carbono y deja el oxígeno en libertad.

Haremos notar también el notable papel que desempeña este gas en los fenómenos de destrucción de las rocas; se inmoviliza en forma de carbonato cuando entra en combinación con ciertas bases. De manera que, aun después de un examen tan superficial como el que acabamos de hacer, aparece *a priori* que la composición de la atmósfera no debe cambiar mucho; porque, si existen causas de desaparición del oxígeno, del nitrógeno, del gas carbónico, se encuentran causas concomitantes de regeneración de estos gases. Y, realmente, Dumas y Boussingault, más tarde Regnault, han demostrado que los dos gases más abundantes, oxígeno y nitrógeno, no sufren más que débiles variaciones en las proporciones relativas en que se encuentran en el aire.

El gas carbónico, cuya fuente principal debe buscarse en los flúidos que se escapan de los cráteres volcánicos, está sometido á oscilaciones bastante fuertes. El estudio de estas oscilaciones ofrece gran interés en razón del importante papel que desempeña este gas en la superficie del globo. En las épocas geológicas pasadas debía ser infinitamente más abundante en el aire que en la actualidad: por esto puede preguntarse si todavía sufre una disminución gradual ó bien si se halla en estado de equilibrio relativo.

Esta cuestión ha preocupado á muchos investigadores; parece que una disminución ó un aumento, aunque débil, de la proporción de este gas ya tan diluído en la atmósfera, produciría profundos cambios en la economía del globo terrestre. En efecto, el gas carbónico y el vapor de agua se comportan como pantallas protectoras respecto de la radiación solar.

Arrhenius, mediante experimentos sobre la permeabilidad respecto del gas carbónico y del vapor de agua, ha podido calcular que, si el ácido carbónico desapareciese completamente de nuestra atmósfera, en la cual entra en la proporción media de 3/10,000, la temperatura del suelo disminuiría de 21 grados. Por efecto de esta baja, la cantidad de vapor de agua disminuiría igualmente: de donde vendría un nuevo descenso de temperatura casi igual al primero. Si solamente desapareciese la mitad del gas carbónico, el enfriamiento sería de 4 grados; si desapareciesen las tres cuartas partes, la baja de temperatura sería de 8 grados. En cambio, si la proporción actual fuese doble, la superficie del suelo ganaría 4 grados (1).

(1) Arrhenius: *L'évolution des mondes.* Traducción francesa, París, 1910, pág. 17.

Un estudio más detenido demuestra en ella la presencia de minerales más ó menos divididos, unos todavía con cantos vivos y otros con las aristas y los ángulos desgastados. Se halla sílice pura, diversos silicatos, calcáreo en granos de muy diversas dimensiones, arcilla que es la última en depositarse: todo está más ó menos teñido de pardo, señal de la presencia de una materia orgánica que se adhiere con tenacidad á los elementos minerales. Formada principalmente por sílice y silicatos, esta arena, tan compleja en cuanto á su composición y, como pronto diremos, en cuanto á su estructura, casi nunca falta en el suelo. Es ella la que, de ordinario, figura en los análisis físicos con la cifra más elevada. Sin embargo, se pueden encontrar suelos en los cuales esta arena no constituya la parte preponderante; pero, este caso es poco frecuente: suelos eminentemente calcáreos, arcillas compactas, turbas. Estos últimos suelos á menudo están desprovistos de vegetación espontánea; á lo menos ésta es en ellos muy limitada: esto es lo que ocurre en los suelos de las dos primeras categorías; ó bien hay en ellos plantas de naturaleza muy especial (plantas de turberas) cuyo valor alimenticio es muy escaso, casi nulo.

En la mayoría de los casos, teniendo precisamente en cuenta su naturaleza y sus orígenes, la *arena,* tal como la acabamos de definir, es la fuente donde toman los vegetales casi todos los elementos fijos que necesitan, si no la totalidad. Se comprende que debe ser así, porque la arena contiene, en estado de combinaciones complejas, potasa, cal, magnesia, fosfatos, etc.

Entre los muy variados elementos que contiene hay uno, sin embargo, que puede faltar á veces por completo: es el carbonato cálcico.

2.° Proporcionémonos muestras de tierras tan diferentes como sea posible. Añadamos á unos cincuenta gramos de cada una de ellas una cantidad de agua tal que la masa no contenga un exceso á fin de que podamos amasarla con la mano. Pronto veremos, en esta manipulación, que algunas muestras se moldean con facilidad y que podemos dar á esta masa la forma que queramos, mientras que, en otras, esto será difícil,

si no imposible, porque el magma obtenido carecerá de cohesión y se desmoronará entre nuestros dedos. Este sencillo ensayo nos enseña que ciertas tierras, las de la primera categoría, deben contener una substancia que *aglutina* la masa, que nos permite darle la forma que queramos y que nos da al tacto la sensación de la almáciga de los vidrieros. La analogía con esta última substancia es real, porque una muestra de éstas frecuentemente se adhiere á los dedos y deja en ellos una materia que se pega con fuerza. En las tierras de la segunda categoría nada de esto ocurre: las partículas de la masa no tienen entre sí ninguna adherencia y no pueden, como en el primer caso, ser modeladas á voluntad. Tomamos adrede aquí dos muestras de estructura muy diferente, pero es claro que, si nuestras investigaciones se extendiesen á un gran número de muestras de tierras bien variadas, encontraríamos todos los términos posibles de tránsito entre las que, una vez mojadas, como hemos dicho antes, adquieren una notable adherencia y dejan en los dedos cantidades mayores ó menores de substancia *aglutinante*, y aquellas cuyas partículas no soldándose entre sí dejan en la mano una masa sin cohesión. La materia que imprime á la tierra esta propiedad particular de formar una masa coherente es la *arcilla*. Es preciso tomar la palabra «arcilla» en el sentido más general, el de una mezcla compleja en que domina la presencia del silicato alumínico hidratado (véase anteriormente, pág. 24). La presencia de la arcilla en una tierra, cuando su proporción es algo elevada, comunica á esta tierra amasada con agua una propiedad característica. Si se deja desecar espontáneamente la masa húmeda, sufre poco á poco una *contracción* que se da á conocer por la formación en su superficie de grietas de longitud y profundidad variables. Según lo que antecede, hemos de admitir, pues, entre los componentes del suelo: la *arena*, en la amplia acepción que hemos concedido á esta palabra, y la *arcilla*, pudiendo esta última faltar ó no existir más que en mínimas proporciones.

3.º Muchas tierras contienen *calcáreo*, cuya presencia se reconoce en que, tratadas por un ácido como el ácido clorhídrico, desprenden un gas con efervescencia y la masa

espumea. El gas que entonces se desprende es el *gas carbónico*. Según verémos ulteriormente, el calcáreo se encuentra en los suelos en estados de división extremadamente variables.

A veces parece que la adición de ácido clorhídrico á ciertas tierras no produce efervescencia alguna; puede ocurrir que, efectivamente, estas tierras no contengan calcáreo (muchas turbas, tierras de brezo, de landas, ciertos suelos forestales). A veces esta efervescencia es tan débil, que es preciso acudir á un procedimiento especial para apreciarla. He aquí cómo conviene operar en este último caso. Se introducen en un tubo de ensayo 2 ó 3 gramos de tierra y una cantidad de agua más que suficiente para cubrirlos. Se hierve algunos minutos á fin de expulsar las burbujas de aire retenidas por la tierra; se deja que se enfríe y se forman dos capas: la inferior, de tierra; la superior de agua casi límpida. Se toman entonces de un frasco que lo contenga, mediante un tubo de vidrio estirado, 2 ó 3 centímetros cúbicos de ácido clorhídrico y se introduce el tubo estirado en el tubo de ensayo, de modo que la punta toque el nivel superior de la capa de tierra. Se deja caer suavemente el ácido y éste penetra en la capa de tierra. Si sólo hay indicios de calcáreo, se perciben pequeñas burbujas de gas que suben á través de la capa de agua que recubre la tierra y que son claramente apreciables, aun cuando la muestra no contenga más que 1/1000 de calcáreo.

4.º Es fácil demostrar la presencia en la tierra del cuarto componente: *la materia orgánica ó humus*. Ésta se encuentra casi siempre, cualquiera que sea el origen de la tierra; pero sus proporciones varían entre límites extremadamente apartados, como veremos más adelante. La existencia de este humus es evidente á primera vista la mayor parte de las veces. En efecto, sabido es que muchas tierras tienen un color más ó menos pardo y aun negro, sobre todo cuando están húmedas. Basta, para mejor convencerse, calentar 1 ó 2 gramos de tierra seca en un tubo de ensayo para ver que poco á poco se ennegrece, lo que es señal de la destrucción de una materia orgánica. El olor que se desprende durante la calefacción frecuentemente es muy característico. Además,

puede completarse este ensayo con el siguiente, que aun es más concluyente. El humus contiene siempre cierta cantidad de nitrógeno cuya importancia es capital en el quimismo del suelo. Si se mezclan en un tubo de ensayo tapado algunos gramos de tierra con un poco de cal sodada y se calcina, el nitrógeno orgánico se convierte en nitrógeno amoniacal, fácil de caracterizar, por de pronto por su olor, y, mejor aún, introduciendo en el tubo de ensayo una tira de papel de tornasol rojo humedecido con agua, el cual toma en seguida color azul.

Acabamos, pues, de reconocer en las más variadas muestras de tierra de labor la presencia de los cuatro componentes fundamentales, á cada uno de los cuales corresponde un papel muy especial, ya directo, ya indirecto, respecto de la nutrición de la planta. Estos cuatro componentes, cuyos nombres recordamos, son: la *arena*, la *arcilla*, el *calcáreo* y el *humus*. Lo que constituye la extrema variabilidad de las tierras, es precisamente la misma variabilidad de las proporciones en que cada uno de estos componentes entra en una muestra dada. La arcilla y el calcáreo pueden, lo repetimos, faltar á veces en absoluto.

II

DEFINICIÓN DE LA CONSTITUCIÓN FÍSICA DE LOS SUELOS

Estando este capítulo dedicado al conocimiento de la constitución física de los suelos, definamos qué debe entenderse con esta expresión y hagamos ver el interés que ofrece el estudio del problema que vamos á abordar.

La constitución física de los suelos lleva en sí la investigación de la estructura de los cuatro componentes que antes hemos mencionado, independientemente de las propiedades químicas que les corresponden y que pueden producir en su masa cambios más ó menos profundos según la intensidad de las reacciones de que sean objeto. La constitución física de los

suelos tiene igualmente como fin el estudio de la importancia relativa de estos cuatro componentes y, en consecuencia, de la manera como actúan entre sí.

Del conocimiento de la constitución física de un suelo deduciremos las reglas que deben seguirse relativamente á las mejoras mecánicas y químicas á que será preciso someter este suelo para que sea capaz de tal ó cual cultivo.

Constitución de la arena.—La arena está formada, como sabemos, por restos de las más variadas rocas, tanto por lo que toca á su tamaño como en cuanto se refiere á su composición.

Este componente es de mucho el más importante en la mayoría de los suelos, los cuales deben sus cualidades ó sus defectos á las dimensiones de los granos de arena. Éstos son agentes de división, y del grado de finura de los granos dependen la compacidad ó la permeabilidad de las tierras. Además, la arena atenúa ó suaviza las propiedades de la arcilla; cuanto más rica es ésta en materias arenosas, más muelle es el suelo que la contiene y más fácil es de trabajar. A los granos de arena está adherida siempre cierta cantidad de materia orgánica; esta especie de *barniz* puede ser superficial si los granos de arena son lisos; pero generalmente tienen anfractuosidades y la materia orgánica penetra en ellos hasta cierta profundidad. Este fenómeno de adherencia ó *adsorción* (1) conviene que sea conocido. Gracias á él la materia húmica, siempre nitrogenada, llega en los suelos con frecuencia á grandes profundidades, poniendo así el nitrógeno en forma muy *diseminada* á disposición de las raíces de las plantas; en último término, se oxida y se convierte en nitrógeno nítrico soluble. Cuando la arena es algo rica en calcáreo, goza entonces de propiedades aun más precisas, porque á su papel de agente mecánico de división se añaden nuevas propiedades físicas (y químicas) relativas á la coagulación de la

(1) No debe confundirse la *absorción* con la *adsorción*. Esta última se refiere á la propiedad que tienen muchos cuerpos de retener parte de las materias contenidas en los líquidos que las atraviesan. La adsorción tiene gran importancia respecto de la propiedad que tienen las tierras de retener materias nutritivas de las plantas, como se verá más adelante.—C. B.

arcilla (véase más adelante), á la descomposición del humus, á la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral, etc.

Constitución de la arcilla.—Antes de hablar de la constitución de esta substancia, hemos de llamar la atención sobre un término que emplearemos á menudo durante nuestros estudios sobre el suelo.

Algunas palabras sobre las substancias coloides.—Se da el nombre de *coloides* ó de *substancias coloides* á ciertas substancias como la goma, la gelatina, etc., que, puestas en contacto con el agua, parecen desaparecer en el seno de este líquido como lo haría un cuerpo soluble propiamente dicho, pero que, en realidad, no forman con el líquido verdaderas disoluciones. En efecto, el líquido no es *homogéneo*, como lo sería una solución de azúcar ó de sulfato de cobre, donde no se pueden distinguir la substancia disolvente y la substancia disuelta. En cambio, en el caso de los coloides, se puede demostrar, con el empleo del ultramicroscopio, que estas *pseudosoluciones contienen siempre partículas extremadamente finas* y que una solución coloide no es más que una suspensión de una materia sólida en un medio líquido. Recordamos también que no existen coloides considerados aisladamente, pero que existen *soluciones coloides;* la naturaleza del disolvente desempeña en este punto un papel preponderante. Cuando un coloide está en suspensión, por ejemplo en el agua, puede ser precipitado, con una velocidad variable, cuando se viertan en el líquido ciertas materias. Esta *coagulación,* que se manifiesta en forma de capas, sólo se consigue con la adición de *electrolitos;* según la naturaleza y la cantidad de éstos, la precipitación es más ó menos rápida. El electrolito añadido puede actuar aún en muy pequeña cantidad en peso que no guarda relación alguna con la cantidad del coloide que se coagula por su influencia. El coágulo retiene siempre una cantidad variable, pero muy pequeña, del electrolito que ha servido para producirlo. Las soluciones coloides desempeñan en el suelo un papel muy importante. Diferentes veces tendre-

mos ocasión de hablar de ellas (véase, á propósito de los *Coloides*, nuestra *Química vegetal)*.

Conocidas las precedentes nociones, vamos á ocuparnos en la constitución de la arcilla.

Esta constitución ha sido especialmente bien estudiada por Schlœsing. Tomaremos los trabajos de este sabio agrónomo como guía en lo que vamos á exponer á continuación.

La arcilla, cuando es pura, es una substancia blanca, de tacto suave; teóricamente, á lo menos, como hemos dicho, es un *silicato de aluminio hidratado*. Hemos visto hace poco que la arcilla formaba con el agua una masa plástica que se agrieta por la desecación. Pero, en los suelos, la arcilla *nunca es pura;* siempre es más ó menos coloreada, unas veces es gris, otras verde, otras roja, á causa de la presencia de materias extrañas, entre las cuales se halla sobre todo el óxido férrico. Además, como vamos á exponer luego, la arcilla, aun la más plástica, esto es, la que se amasa mejor con el agua y conserva, después de la desecación, la forma que se le ha dado, contiene siempre una considerable cantidad de elementos arenosos que están íntimamente mezclados con su masa. La presencia de estos elementos, restos de rocas de finura y composición variables, comunica á la arcilla cierto grado de fertilidad que no tendría si, como el caolín, estuviese únicamente formada por silicato de aluminio.

Posible es convencerse fácilmente de la presencia de restos arenosos en una arcilla determinada malaxando algunos gramos de la misma en un almirez con una cantidad de agua destilada suficiente para que resulte una mezcla flúida. Llega un momento en que, al frotar la mano del mortero con el fondo de éste, se nota un rechinamiento especial que es debido á la trituración de los granos de arena. Basta decantar el líquido turbio y volver á principiar la operación algunas veces para que finalmente no quede en el mortero más que un depósito que evidentemente es de arena.

La arcilla — y desde ahora entenderemos con esta palabra el silicato de aluminio hidratado puro, suponiéndolo separado de los elementos arenosos que le acompañan — es un *coloide*.

La arcilla es una materia coloide. — Según Schlœsing, se pueden poner fácilmente de manifiesto las notables propiedades coloides de la arcilla de la siguiente manera: Se toma cierta cantidad de tierra que se desmenuza y reparte en dos filtros, ó que se reparte en dos tubos verticales de 2 ó 3 centímetros de diámetro y de unos veinte centímetros de longitud y estirados en su parte inferior. En uno de estos filtros y en uno de los tubos se vierte agua ordinaria En el segundo filtro y en el segundo tubo se pone agua destilada. Si se prolonga bastante el lavado, de los dos primeros aparatos que han recibido agua ordinaria escurrirá siempre un líquido límpido. De los otros dos, en que se ha empleado agua destilada, primero escurrirá un líquido límpido; pero, paulatinamente, se volverá turbio y, al mismo tiempo, irá disminuyendo la cantidad de agua que sale. Estos dos experimentos sólo difieren entre sí por *la naturaleza* del agua empleada; el agua ordinaria contiene siempre en disolución sales y, especialmente, sales cálcicas; el agua destilada está exenta de sales. Parece, pues, que la persistente limpidez del líquido en el primer caso puede atribuirse á la presencia de sales cálcicas en el agua que se ha empleado en el lavado de la tierra, y que el enturbiamiento de los líquidos escurridos en el segundo caso debe ser atribuído á la ausencia de estas sales en el agua destilada.

Se puede justificar esta suposición de la siguiente manera: Tratemos algunos centenares de gramos de tierra, puestos en un gran lebrillo, con ácido clorhídrico diluído, removamos bien la masa para que se descomponga todo el calcáreo y después dejemos que se pose. Decantemos el líquido perfectamente límpido que hay encima del magma de tierra y luego vertamos en ésta agua destilada, agitemos, dejemos posar, y decantemos el líquido límpido. Después de repetir varias veces esta operación veremos que el líquido, que al principio se clarificaba con facilidad, poco á poco toma un aspecto turbio y finalmente queda opaco. Vertamos en una gran campana de vidrio una parte de este líquido opaco y dejémosle en reposo. No tardaremos en observar que algunas partículas sólidas caen con bastante rapidez al fondo de la campana; pero, después de muchas horas, aun después de muchos días, la parte superior del líquido quedará siendo turbia. Existen, pues, en este medio heterogéneo, partículas sólidas que descienden por la acción de la gravedad, mientras que otras pueden permanecer en *suspensión* durante un período de tiempo considerable. La materia suspendida así en el seno del agua es *arcilla* y presenta esta especial propiedad en virtud de su estado coloide.

Si nos hallamos realmente en presencia de un coloide en este caso, podemos asegurarnos de ello, probando de *coagularlo* con la adición de un *electrolito*, esto es, de una substancia soluble en el agua y cuya solución es capaz de conducir la electricidad.

Vertamos, pues, en la campana de vidrio una pequeña cantidad de una sal de calcio, por ejemplo cloruro, y agitemos. No tarda-

remos en ver que la parte superior de la columna líquida se aclara poco á poco, mientras que se forman copos de una materia agrisada, que descienden lentamente y finalmente se depositan encima de los elementos que, ya al principio, habían caído rápidamente al fondo de la campana. Si se recoge aparte esta materia cuajosa, se le quita por decantación la mayor parte del líquido que la baña y se la deja desecar al aire, se convierte en una masa amorfa que se agrieta con la desecación. Si se humedece con un poco de agua, se puede malaxar entre los dedos; tiene, pues, los caracteres que hemos dicho poseía la arcilla y, además, su composición se aproxima á la del silicato de aluminio hidratado típico que representa la arcilla pura. Las sales cálcicas no son las únicas, entiéndase bien, que son capaces de producir la coagulación que acabamos de señalar. Cualquiera otra sal produciría los mismos efectos, pero con una rapidez variable con la naturaleza de la sal empleada. Las sales de los metales monovalentes son menos eficaces que las de los metales bivalentes. Los metales de la misma valencia tienen poco más ó menos el mismo poder de coagulación. Según Schlœsing, $\frac{1}{5000}$ de cal, libre ó combinada en una sal, produce una precipitación inmediata; en la proporción de $\frac{1}{10000}$, la precipitación requiere algunos días; no se efectúa si la proporción baja á $\frac{1}{20000}$. Pero, como hace observar el citado autor, estas cifras no tienen nada de absoluto; varían con las diversas suertes de limos empleados.

Los ácidos minerales, por ser electrolitos, deben poder coagular la arcilla, como coagulan los coloides en general, y especialmente los coloides minerales. Esto es, en efecto, lo que se observa cuando en vez de añadir una sal cálcica al líquido turbio, como hemos hecho anteriormente, le añadimos una pequeña cantidad de un ácido mineral cualquiera. Se forman los mismos grumos y se depositan con una rapidez que varía con la naturaleza del ácido empleado. El poder coagulante de una substancia depende de su grado de *disociación* ó *ionización*. Este poder, notable en los ácidos minerales, es mucho más débil en los álcalis y en los carbonatos alcalinos.

Volvamos ahora á nuestro experimento inicial, en que hemos lavado la tierra, puesta en un filtro ó en un tubo. En el caso en que hemos hecho uso del agua común para el lavado, el líquido pasaba límpido, por más tiempo que durase el lavado. Esta agua, efectivamente, contiene siempre una pequeña cantidad de sales cálcicas que mantienen la arcilla en estado de coagulación y que, en consecuencia, impiden que tome el estado coloide; de lo cual deriva la persistente limpidez del agua que filtra á través de la tierra. En el segundo caso, en que hemos empleado agua destilada, ésta da primero un líquido límpido, porque, al atravesar la masa, disuelve una pequeña

cantidad de calcáreo, en forma de bicarbonato, suficiente para mantener la coagulación de la arcilla. Pero, si el lavado se prolonga, y deberá prolongarse tanto más cuanto mayor sea la proporción de calcáreo contenido en la muestra de la tierra primitiva, el agua destilada acabará por disolver todo el calcáreo. En este momento no existirá en la tierra sometida al tratamiento el agente salino capaz de mantener la arcilla coagulada; la arcilla se pondrá en suspensión y obstruirá los intersticios de la masa de tierra á través de los cuales el agua antes pasaba con facilidad. Por esto el agua escurrirá cada vez con más lentitud y el líquido irá siendo más y más turbio hasta el momento en que el agua dejará de escurrir.

Fácilmente se comprende por qué es preferible, para llevar la arcilla al estado de suspensión, tratar la tierra inicial con ácido clorhídrico y lavarla después de este tratamiento repetidas veces con agua destilada; así se le quita más pronto el calcáreo. Mientras que, si se emplea el agua destilada sola desde el principio, á veces se necesita muchísimo tiempo para conseguir el mismo resultado: la solubilidad del calcáreo en estas condiciones es muy escasa.

Se puede también hacer con la arcilla, coagulada por una sal cálcica, un interesante experimento. Vertamos en un filtro de papel, colocado en un embudo, el contenido de la vasija en que hemos coagulado la arcilla mediante una sal cálcica. Saldrá del pico del embudo un líquido límpido. Si, después de haber escurrido, lavamos la arcilla con agua destilada, ésta se carga de pequeñas cantidades de sal cálcica retenidas por los grumos arcillosos y veremos que el líquido que pasa todavía es límpido. Pero, al cabo de cierto tiempo, principiará el agua á volverse turbia y saldrá más lentamente. En este momento la arcilla ha acabado de ceder al agua destilada la sal cálcica que la mantenía en estado de coagulación; los grumos de arcilla se ponen en suspensión, obstruyen poco á poco los poros del filtro y dificultan así el paso del agua. La observación de esta particularidad nos servirá ulteriormente en la práctica del análisis físico de la tierra de labor.

Vertiendo algunas gotas de una sal cálcica en el filtro, se determina de nuevo la coagulación de la arcilla: vuelve á escurrir el líquido y éste es límpido, y así sucesivamente.

Consecuencias prácticas de las propiedades coloidales de la arcilla. — Schlœsing ha deducido de los hechos que preceden cierto número de explicaciones relativas á la permanencia de los efectos producidos por las labores y á la persistencia de la limpidez de las aguas naturales.

El objeto del laboreo de las tierras es dividir el suelo lo mejor posible, de manera que se formen intervalos capaces de dejar paso al agua de lluvia, al aire y á las raíces de las plantas. Las sales cálcicas mantienen la arcilla coagulada y ésta cementa los granos de arena é impide que se reúnan. La presencia del calcáreo es, pues,

indispensable, y se comprende que, si esta substancia llegara á desaparecer á causa de un lavado prolongado, como en el experimento de los tubos de que se ha tratado antes, sería necesario volverla á poner en el suelo. Este efecto de la presencia del calcáreo, del cual tendremos á menudo ocasión de hablar á continuación, permite igualmente comprender la necesidad en que nos encontramos de añadir cierta proporción del mismo á las tierras arcillosas cuyo cultivo es difícil, si no imposible, á causa de su compacidad y de su aptitud para retener el agua sin dejarla escurrir á las partes profundas del suelo. En estas condiciones, las raíces de los vegetales se ahogan, su respiración se detiene y la planta muere.

El agua de lluvia, que es un agua casi pura, al caer al suelo debería determinar la impermeabilidad de éste á causa de ponerse la arcilla en suspensión. Pero, generalmente, la caída del agua es bastante lenta para que ésta pueda disolver al pasar cantidades suficientes de calcáreo para mantener coagulada la arcilla; además, encuentra en el suelo una proporción de gas carbónico mucho mayor que la que contiene el aire normal: de donde se origina un aumento de su poder disolvente del carbonato cálcico. Así es que las aguas de infiltración y las aguas de fuente son casi siempre perfectamente límpidas. Si, por el contrario, el agua de lluvia cae en considerable cantidad en corto tiempo, no puede disolver al atravesar el suelo una proporción de calcáreo suficiente para mantener la arcilla coagulada: entonces ésta entra en suspensión. De esto deriva el enturbiamiento temporal de las aguas de fuente y de infiltración.

Un agua de río ó de torrente, que no contenga á lo menos 60 miligramos de calcáreo por litro, queda siempre turbia: así ocurre con las aguas procedentes de los ventisqueros. Cuando estas aguas llegan á mezclarse con las de un río que sean bastante ricas en cal, la arcilla se precipita y determina la formación de depósitos sedimentarios á una distancia que varía con la velocidad de la corriente. Toda agua arcillosa que se mezcla con el agua del mar forma igualmente un precipitado en seguida, á causa de la gran riqueza de esta última agua en sales de muy diversa naturaleza.

Arcilla coloide verdadera. — Una arcilla natural determinada está formada siempre de arena y un coloide especial. Este no constituye, en realidad, más que una muy pequeña parte de la arcilla en bruto, como ha demostrado Schlœsing mediante los ensayos siguientes. Se toma, como antes, una tierra ó una arcilla y se somete á la acción del ácido clorhídrico para quitar todo el calcáreo. Se lava con agua destilada hasta que desaparezca totalmente la acidez; se pone el residuo en una gran campana de pie, luego se añade agua destilada, adicionada de un poco de amoníaco para favorecer la difusión de la arcilla, y se deja en reposo. Sabemos que la arena se precipitará poco á poco, primero los granos gruesos, después los más finos. Al cabo de algunos días se decanta en otra campana el líquido turbio

que hay encima del sedimento arenoso. Después de reposo, se forma en el fondo de esta segunda campana un sedimento arenoso más fino aún que el formado en la primera. Esta operación, repetida muchas veces, da depósitos cada vez más pequeños y cuyos granos van siendo cada vez más finos. Al cabo de muchos meses, esta precipitación arenosa ha terminado, pero el líquido que cubre el poso sigue siendo turbio. Este líquido, decantado otra vez y tratado por una sal cálcica, forma grumos que, recogidos en un filtro y bien lavados, suministran por desecación una materia dura, retráctil: es la *arcilla verdadera*, la *arcilla coloide*, como la llama Schlœsing; es el *verdadero cemento de las arcillas en bruto*, que, y nunca se repetirá demasiado, no son más que mezclas muy íntimas de esta arcilla coloide con proporciones muy variables de arena fina. La materia arenosa de por sí no tiene ninguna cohesión: es la arcilla coloide la que le comunica esta propiedad. La arcilla llamada *grasa* no contiene apenas más que 1,5 por 100 de arcilla coloide; si la proporción es menor de 0,5 por 100, la arcilla se llama *magra*.

Así, en resumen, toda arcilla está formada por dos partes: la una, que es la principal, es la arena cuyos fragmentos de volumen muy variable carecen de cohesión; la otra, que reúne y suelda estos elementos arenosos, es la arcilla coloide, definida como hemos dicho antes. La arcilla desempeña en las tierras de labor un papel muy importante, pero no es el único *cemento* de los suelos: existe otro cuyas propiedades pronto examinaremos.

Constitución del calcáreo. — Todas las tierras de labor destinadas al gran cultivo deben contener calcáreo. La riqueza de los suelos en esta substancia es extremadamente variable; desde vestigios hasta 90 por 100. Como veremos más adelante, más bien que la proporción absoluta de calcáreo, cuando se trata de apreciar su grado de actividad química importa más el *estado de división* que tiene el calcáreo en el suelo (1). Dado su múltiple papel, el calcáreo no es verdaderamente activo más que cuando existe en granos muy finos que puedan disolverse fácilmente por la acción del agua

(1) Al efectuar determinaciones aproximadas del calcáreo de la tierra mediante el calcímetro de volumen y empleando el ácido clorhídrico algo diluído para descomponer el carbonato y poner en libertad el gas carbónico, ordinariamente se desprende éste en seguida en su totalidad y el volumen de gas desprendido no sufre variación sensible. Operando con tierras de Cataluña, algunas veces, ciertamente pocas, se ha observado que parte del gas carbónico no acababa de desprenderse más que al cabo de algunas horas después de ponerse en contacto el ácido clorhídrico con la tierra. Es posible que estos hechos no sean exclusivamente debidos al estado de división del calcáreo.—C. B.

y del gas carbónico: en esta última forma es el agente de la coagulación de la arcilla y es capaz de mantener la división especial de los elementos de la tierra de labor. Por su misma solubilidad, el calcáreo, á la larga, puede desaparecer de ciertos suelos: de donde la necesidad de devolvérselo por medio del encalado ó de la adición de marga. Cuando el calcáreo se halla en forma de granos gruesos, ó de masas aun más voluminosas, es muy poco activo.

Constitución de la materia orgánica. — No hablaremos aquí más que del lado físico de la cuestión; la constitución química de la materia orgánica será objeto de un capítulo ulterior. Esta materia existe en todos los suelos, pero en proporciones muy diversas. Procede de la parte orgánica de los vegetales y se encuentra en una serie de formas físicas y químicas que principian en la caída de los órganos vegetales al suelo, continúan con la combustión lenta del carbono y del hidrógeno y acaban con la destrucción total de la materia que se convierte en gas carbónico y agua. Cuando la materia vegetal se halla anegada en una capa de agua más ó menos grande, su descomposición es infinitamente más lenta que al aire libre. Se da el nombre de *humus* á la materia compleja, parda ó negra, que se encuentra en el suelo. Este humus está dotado de cualidades físicas muy preciosas. Con frecuencia desempeña el papel de *cemento* respecto de los elementos arenosos en multitud de tierras; además, corrige las propiedades de la arcilla. Este doble papel ha sido puesto en evidencia por Schlœsing. Veamos cómo puede definirse.

Ciertas tierras, por ejemplo las de los bosques, á menudo no contienen más que vestigios de arcilla. Puestas en una alargadera y lavadas con agua, dejan pasar con facilidad un líquido límpido: las partículas térreas no se aproximan, no se sueldan. Si se substituye el agua por una solución alcalina débil de amoníaco, el líquido que escurre tiene color más ó menos pardo. A medida que se disuelve esta substancia parda, las partículas térreas se aproximan y el líquido escurre cada vez con más dificultad. De esto se deduce que el agua amoniacal ha quitado á la tierra sometida al ensayo una materia que mantenía la división especial de los elementos, del

mismo modo que la arcilla coagulada aseguraba esta división en los ejemplos que hemos estudiado anteriormente. Si se añade al líquido amoniacal pardo una sal cálcica, se forman copos de una materia coloide; es *humato calcico*. Es evidente que no se trata aquí de un compuesto químico definido, sino de una mezcla en proporciones variables de muchas substancias, unas minerales y otras orgánicas. El humus, en ausencia del calcáreo, posee propiedades ácidas; por esto es que muchas veces se llama al humus: *ácido húmico*. Se dice también que los suelos ricos en humus, y desprovistos de calcáreo, son *suelos ácidos*. Sea lo que fuere, si se deja desecar el humato cálcico al aire, queda una substancia amorfa, parda, agrietada, de fractura irregular. Si, cuando todavía está húmeda, se malaxa esta substancia con arena ó calcáreo, aun en la proporción poco elevada del 1 por 100, comunica á la mezcla la propiedad de seguir coherente, de poder conservar cualquier forma que se le dé moldeándola entre los dedos. Si se desmenuza una masa de esta naturaleza en una alargadera de vidrio y se vierte encima agua calcárea, y aun agua destilada, se deja *atravesar por el líquido* sin desleírse; sus elementos conservan cierto grado de cohesión. De aquí la conocida expresión: *el mantillo da cuerpo á las tierras ligeras*. Las aplicaciones prácticas de esta propiedad son numerosas. Inversamente — y éste es uno de los lados más notables de la presencia del humus en el suelo — la materia orgánica *corrige* las propiedades de la arcilla. Cuando están mezclados, en vez de sumar sus efectos, estos dos coloides actúan entre sí, de modo que la cohesión de la arcilla disminuye y, por consiguiente, su permeabilidad para el agua y para los gases aumenta. La cohesión de la arcilla es tanto menor cuanto mayor es la proporción del humus: lo que se traduce á menudo por esta expresión: *el mantillo vuelve muelles á las tierras fuertes*. También se recurre á menudo, en la práctica, á la adición de abonos orgánicos á las tierras arcillosas obteniendo los mejores efectos. Schlœsing opina que el coloide orgánico aprisiona á la arcilla como una red: esta arcilla no puede distenderse por la acción del agua y sus partículas ya no son capaces de soldarse entre sí por la desecación. Resulta de lo que se acaba de decir que el coloide *humus* posee las propiedades de cemento del mismo modo que la arcilla, á lo menos en ciertos casos; es, pues, necesario reintroducirlo de vez en cuando en el suelo en forma de abonos orgánicos ó de abonos verdes, porque desaparece lentamente por combustión total.

Parece que entre la arcilla y el humus existe una *especie de combinación*, que Schlœsing pone de manifiesto de la siguiente manera. Se trata la tierra vegetal con ácido clorhídrico para destruir el calcáreo que contiene y para eliminar la cal, el hierro y la alúmina combinados con la materia húmica, bases que hacen á esta última insoluble. Se lava esta masa térrea con agua destilada, se introduce luego en un frasco, se añade una solución diluída de amoníaco ó de potasa y se agita fuertemente. Hecho esto, se añade un

poco de cloruro potásico á fin de coagular la arcilla difundida en el líquido (y no una sal cálcica, que sin duda precipitaría la arcilla, pero también, á la vez, la materia húmica). Al cabo de uno ó dos días, se decanta el líquido límpido de marcado color pardo, y se neutraliza con ácido clorhídrico hasta formación de copos. Existen tierras de bosques, por ejemplo, que pueden lavarse directamente con agua amoniacal; en seguida se neutraliza con ácido clorhídrico. Cuando se extrae el ácido húmico de una tierra, como se acaba de decir, se observa que al coagularse la arcilla arrastra siempre consigo una cantidad variable de humus. Este puede ser recuperado en parte poniendo la arcilla en suspensión en agua amoniacal y coagulándola de nuevo. Así, la *arcilla arrastra el humus*. Además, si se quiere coagular una arcilla en suspensión en el seno de una solución alcalina de humus, se encuentra que es necesario emplear proporciones del agente coagulante tanto mayores cuanto más humus existe. Así, pues, el *humus retiene la arcilla*.

La arcilla, aun desecada, se vuelve fácilmente plástica cuando se pone en contacto con agua; no ocurre lo mismo con los humatos. Estos, endurecidos por la desecación, no recobran su plasticidad en presencia del agua; pero, cuando están mezclados con la arcilla, se comportan como ella en este concepto.

En resumen, se puede concebir la arquitectura de la tierra de labor de la siguiente manera. Supongamos una serie de granos puramente cuarzosos, del todo independientes unos de otros y de dimensiones tan variables como se quiera. El agua y los gases no podrán penetrar entre los granos más que cuando éstos dejen entre sí cierto espacio; cuanto mayor sea éste, mayor será la proporción de flúidos que podrán alojarse en él. Pero, en la mayoría de las tierras, los granos de arena nunca son independientes unos de otros; están agrupados en pequeñas masas de forma irregular que se yuxtaponen, y precisamente esta disposición es el origen de los espacios intersticiales donde se almacenan el aire y el agua.

¿Por qué pueden subsistir estos espacios vacíos á pesar de los trabajos de cultivo á que se somete la tierra de labor y á pesar de la caída del agua de lluvia? No pueden subsistir más que mientras exista una substancia que aglutine estos granos en pequeños grupos y haga el suelo *muelle*, esto es, forme aglomerados distintos unos de otros.

La *arcilla*, y lo mismo el *humus*, según los casos, desempeñan el papel de *cementar* entre sí un número mayor ó

menor de estos granos de arena. La arcilla, cuando está coagulada, en virtud de la presencia de las sales cálcicas, provoca y mantiene este estado de aglutinación en que están englobados muchos granos de arena. Pero, si las sales cálcicas llegan á ser eliminadas por un lavado con agua destilada, por ejemplo, los aglomerados que retenía el cemento arcilloso se desmoronan, los espacios libres se llenan, y la arcilla — que aseguraba, gracias á la presencia de las sales cálcicas, la soldadura de los elementos constituyentes de estos aglomerados — entra en suspensión: forma una suerte de velo y priva la circulación del agua.

El humus, por su parte, en las tierras de bosques, de landas, de brezos, asegura igualmente, en vez de la arcilla, la división del suelo en aglomerados. Si este humus llega á desaparecer por combustión, ó por disolución (en un álcali), el estado de aglutinación ó *estado especial* cesa en seguida. Los granos de arena vuelven á ser independientes, se aproximan unos á otros y obstruyen los espacios que antes eran libres.

El estado especial está, pues, asegurado por la presencia de los cementos que obran cada uno según las circunstancias del medio: el uno es un *cemento mineral* (arcilla), el otro es un *cemento orgánico* (humus). Si el primero se desprende de los elementos arenosos, y si el segundo desaparece por combustión, ó disolución, cada uno de los granos de arena del aglomerado recobra su libertad: los granos se ponen en íntimo contacto, y el conjunto de la tierra pierde una parte de su permeabilidad al agua y á los gases.

III

ESTRUCTURA DEL SUELO. SUS RELACIONES CON EL AGUA Y CON EL AIRE DESDE EL PUNTO DE VISTA FÍSICO

Acabamos de estudiar la *naturaleza física* de los componentes del suelo y hemos definido los estados en que se encuentran en la tierra de labor. Es del todo necesario, para

el cultivo, que la tierra almacene cierta cantidad de agua de que podrán disponer las raíces que hay en ella, como también cierta cantidad de aire, que está encargado de asegurar, gracias á la presencia del oxígeno, la respiración de las raíces. Esta agua y este aire circulan entre las partículas de la tierra: conviene investigar cuál es el espacio reservado á estos flúidos. Vamos, pues á examinar ahora, desde el punto de vista más general, la naturaleza y la capacidad de los espacios donde circulan los flúidos, y volveremos ulteriormente, con más pormenores y más precisión, á ocuparnos en la mayoría de los puntos que vamos ahora á examinar sumariamente, cuando tratemos en el capítulo siguiente de las propiedades físicas de los suelos.

Espacios huecos del suelo; dimensiones de los elementos. — Es muy importante tratar de conocer el volumen de los espacios vacíos que dejan entre sí los granos sólidos de que está formada la tierra de labor. Este espacio intersticial puede ser considerablemente agrandado: el laboreo de la tierra no tiene otro objeto. Permite, destruyendo el apelmazado que sufre la tierra por efecto del cultivo y de las lluvias, aumentar la capacidad del suelo respecto de los flúidos, agua y aire, que conviene mucho hacer penetrar alrededor de sus partículas. Se sabe, efectivamente, que si se abre mediante la laya un hoyo de cualquier dimensión en un suelo, y luego se echa en seguida en esta cavidad la totalidad de la tierra sacada antes, esta tierra tiene un volumen mayor que el del hueco y forma una superficie convexa saliente. Esta manipulación ha aumentado, pues, sensiblemente el volumen aparente de la tierra, á causa del aprisionamiento de cierta cantidad de aire. Independientemente del trabajo del hombre, se forman naturalmente *vacíos* en la tierra de labor por efecto de la intervención de ciertas acciones mecánicas, como ocurre en la penetración de las raíces. Cuando las raíces mueren, dejan, después de su descomposición, espacios libres más ó menos considerables. Deben citarse también, entre las acciones mecánicas destinadas á aumentar los poros del suelo, las que ejercen ciertos animales

que viven dentro de la tierra, principalmente los gusanos. Se deberán tener también en cuenta los fenómenos físicos, como las heladas, que levantan la superficie del suelo por efecto de un aumento de volumen debido á la transformación del agua líquida en hielo. Sabido es, en efecto, que, después de fuertes heladas, la superficie del suelo parece haberse dilatado y presenta una serie de pequeños montículos.

Veremos más adelante cómo se puede evaluar, en un caso determinado, el volumen de los gases incluídos en el suelo mismo. El modo de operar, tal como lo indicaremos, tiene sólo una utilidad *práctica*. Pero, se puede tratar la cuestión desde el punto de vista teórico y buscar cuál es el volumen libre que dejan entre sí las partículas térreas, suponiendo que éstas tengan formas geométricas bien definidas y posiciones también bien definidas unas respecto de otras. He aquí algunos ejemplos destinados á fijar las ideas por lo que se refiere á estas partículas, que pueden dar una noción aproximada del tamaño de los espacios libres.

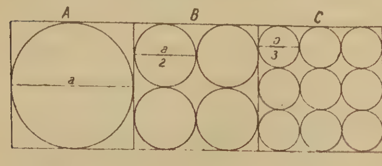


Fig. 1.

1.° Supongamos que las partículas del suelo tienen todas ellas la forma de esferas de igual diámetro y que estas esferas están dispuestas de la manera indicada en la figura 1.

La textura del suelo será entonces *cúbica*. Supongamos que, en un cubo de arista a, se inscribe primero una sola esfera. El volumen de este cubo es a^3, el de la esfera es igual á $\frac{1}{6}\pi a^3$ (A). Si, en este mismo cubo, suponemos inscritas 8 esferas iguales, éstas tendrán por diámetro $\frac{a}{2}$ y su volumen total será $\frac{1}{6}\pi\frac{a^3}{8}\times 8 = \frac{1}{6}\pi a^3$ (B). En el caso de 27 esferas iguales, inscritas en el cubo, el diámetro de cada una de ellas será igual á $\frac{a}{3}$ y su volumen total será igual á $\frac{1}{6}\times\frac{a^3}{27}\times 27 = \frac{1}{6}\pi a^3$ (C), y así consecutivamente. De modo que el volumen total de estas esferas es *independiente de su diámetro*.

Comparemos el volumen del cubo que las contiene todas con su

propio volumen; encontraremos que las esferas ocupan, para 100 del volumen total, un volumen de:

$$\frac{a^3}{\frac{\pi a^3}{6}} = \frac{100}{x} \qquad x = \frac{100\,\pi}{6} = 52{,}36.$$

Por consiguiente, los *espacios libres* ó poros ocuparán un volumen de $100 - 52{,}36 = 47{,}54$. Tal es la expresión del volumen intersticial en el caso de las esferas del mismo diámetro dispuestas como hemos dicho. Es el espacio *máximo* que puede existir teóricamente; por lo demás, se acerca bastante á la realidad.

Busquemos ahora, en la disposición precedente, cómo varía la *superficie de las esferas* con su número, porque esta noción nos servirá muy á menudo en lo que sigue. Siendo la arista de nuestro cubo a, su superficie total será igual á $6a^2$. La superficie de la esfera inscrita (fig. 1, A) es igual á πa^2. La superficie de las 8 esferas cuyo diámetro $= \frac{a}{2}$ (fig. 1, B) es igual á $\frac{\pi a^2}{4} \times 8 = 2\pi a^2$. La superficie de las 27 esferas cuyo diámetro $= \frac{a}{3}$ (fig. 1, C) es igual á $\frac{\pi a^2}{9} \times 27 = 3\,\pi a^2$, etc. Es decir, que la superficie total de las esferas inscritas en un mismo cubo aumenta con el número de estas esferas, varía en razón inversa del diámetro de las mismas. Así, la esfera de la fig. 1 A tiene una superficie que es la mitad de la de las 8 esferas de la fig. 1 B, las cuales tienen en conjunto el mismo volumen que la esfera A; su superficie es el tercio de la de las 27 esferas de la fig. 1 C, las cuales en conjunto tienen el mismo volumen que la esfera A, etc.

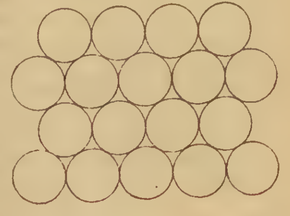


Fig. 2.

Supongamos ahora que, teniendo todas las esferas el mismo diámetro, estén dispuestas como en la fig 2 (estructura piramidal). El espacio vacío será en este caso el *mínimo* y llegará á 25,95 por 100 del volumen total. Este espacio será también independiente del diámetro de las esferas, con tal que éstas sigan siendo todas iguales.

Pero, se puede también considerar el caso, ciertamente más próximo á la realidad, en el que haya esferas más pequeñas que ocupen una parte de los espacios libres entre las esferas grandes. En este caso, el espacio intersticial disminuye mucho y su volumen puede disminuir mucho respecto del que hemos considerado como el mínimo en la precedente disposición. Inversamente, si las esferas en

la disposición cúbica fuesen parcialmente huecas, el espacio intersticial aumentaría forzosamente y pasaría de la cifra 47,64 por 100.

Los cálculos teóricos que pueden hacerse en este orden de ideas no carecen de interés; sin embargo, debe pensarse que nunca existe un suelo de elementos absolutamente regulares y que el grado de compresión nunca es homogéneo de un extremo á otro de una pieza de tierra cuya constitución, determinada por el análisis, parecía sensiblemente uniforme En realidad, los espacios intersticiales varían para un volumen de tierra dado, de unos 20 á 60 por 100. El humus, si fuese el único componente de la tierra, podría presentar un espacio intersticial mayor del 75 por 100 del volumen total.

Por otra parte, es evidente *a priori* que un conjunto tan complejo como el que representa la tierra de labor, que contiene restos de rocas de infinidad de tamaños, como veremos al tratar del análisis mecánico, escapa á toda definición matemática, Además, y nunca se repetirá demasiado, la tierra no está formada por partículas aisladas, sin ningún lazo de unión con sus vecinas y comportándose de una manera autónoma, sino por una *asociación* de partículas reunidas entre sí, en las más variadas formas, mediante los fermentos coloides que hemos estudiado en las anteriores páginas. Observemos, además, que el volumen absoluto de los espacios intersticiales será el correspondiente al caso ideal de que la tierra estuviese completamente desprovista de agua. Este flúido, en realidad, ocupa siempre una parte del espacio intersticial, por delgadas que sean las películas líquidas que recubren las partículas de tierra.

Hemos indicado antes las causas artificiales y naturales que aumentan el volumen de la tierra: laboreo, acción de las heladas, trabajos de ciertos animales, penetración de las raíces, descomposición de los restos vegetales ó de abonos orgánicos; de manera que, si queremos evaluar el espacio intersticial de tal ó cual suelo, considerado en su estado actual, únicamente podemos acudir á la experiencia directa. Se puede hacer la determinación de una manera algo grosera, poniendo la tierra en un vaso de capacidad conocida. Se averigua luego el peso del conjunto y se vierte poco á poco agua en la tierra agitando con una varilla para expulsar todas las burbujas gaseosas. Cuando el agua llega á la superficie, se pesa de nuevo, y la diferencia entre las dos pesadas indica el peso del agua introducida y, también, el volumen de los espacios libres. Pero, operando así, nunca se tiene la seguridad de expulsar completamente los gases incluídos en la tierra. Además, el volumen intersticial natural es modificado por el hecho mismo del transporte de la tierra al vaso en que se hace el ensayo. Indicaremos más adelante un procedimiento más correcto.

No son ciertamente las arcillas, de elementos á menudo muy finos, las que presentan menores espacios intersticiales. Hall hace notar que, en las arcillas compactas, estos espacios llegan aproximadamente al 50 por 100, mientras que varían entre 25 y 30 por 100

en las arenas gruesas de textura uniforme. Según este autor, en las tierras de grano fino es donde se debe encontrar el máximo de espacios intersticiales, porque el peso de los granos de arcilla es demasiado pequeño para vencer el frotamiento: estos elementos no pueden cambiar de sitio para ocupar la posición que daría el mínimo de espacio vacío.

Según Ramann, los espacios intersticiales disminuyen, en un suelo no labrado, con la profundidad. Pero, á partir de cierta distancia de la superficie, estos espacios tienen un volumen poco más ó menos constante; suponiendo, bien entendido, que el suelo considerado sea sensiblemente homogéneo en su formación.

Superficie de los elementos que forman el suelo. — Se puede prever, *a priori,* que la superficie de la tierra de labor debe ser considerable, puesto que está formada por una infinidad de granos, de dimensiones variables sin duda, pero á menudo muy pequeños.

Hemos dicho anteriormente que, cuando el diámetro de las esferas (que suponíamos constituían las partículas del suelo y ocupaban un volumen determinado) disminuía de la mitad, la superficie de estas esferas pasaba á ser doble. Si se comparan, pues, entre sí dos suelos diferentes en igualdad de volumen, la superficie de las partículas de que se componen será tanto mayor cuanto más pequeñas sean estas partículas. Sobre este punto se han hecho cálculos fáciles de imaginar. Pero, generalmente, estos cálculos se refieren á partículas que se supone tienen una forma geométrica y un tamaño determinado; lo que no ocurre, de ordinario, en la realidad. Sin embargo, si se trata un suelo puramente arenoso, cuyas partículas, independientes unas de otras, tienen una dimensión que puede determinarse poco más ó menos por medio del tamiz, es posible calcular, de una manera que se acerca á las condiciones naturales, la superficie de cada porción de tierra que tenga un volumen ó un peso determinados.

Limitémonos á los ejemplos siguientes. Si se admite que la arena, definida como *arena fina*, tiene un diámetro medio de 0,175 milímetros para cada una de sus partículas, la superficie de 1 gramo de esta arena será de 129 centímetros cuadrados. Suponiendo que el diámetro medio de las partículas de arcilla sea igual á 0,00255 milímetros, la superficie de 1 gramo de arcilla será de 8878 centíme-

tros cuadrados (Garola). Se ve, según esto, cuán colosal sería la superficie de un suelo arcilloso considerado solamente hasta la profundidad de 40 centímetros y en una extensión de 1 hectárea.

El diámetro de los granos de las arcillas plásticas varía entre 0,0001 milímetros y 0,005 milímetros; el diámetro de los granos de arena gruesa es de unos 2 milímetros: éstos son los límites extremos. Se da el nombre de *cascajo* á los materiales que tienen un diámetro de 2 á 5 milímetros y de *cascajo grueso* á los materiales de un diámetro de 5 á 10 milímetros. Los *guijarros* ó piedras propiamente dichas tienen un diámetro mayor de 10 milímetros (Wollny).

Capacidad del suelo respecto de los flúidos: agua y gas. — Existe, pues, según lo que precede, un espacio intersticial muy notable en el suelo. Este espacio sirve para almacenar el agua y los gases. En la mayoría de los suelos, especialmente en los sometidos á un cultivo regular, estos dos flúidos existen siempre y su presencia es indispensable para el desarrollo normal de las plantas. Veremos, al tratar del laboreo del suelo cómo se pueden aumentar los espacios intersticiales en provecho de la vegetación.

Ocupémonos ahora sólo en la presencia en él de gases en estado estático, y busquemos luego un medio sencillo y práctico que nos permita determinar el volumen total de los flúidos (gas y agua) que están incluídos en un volumen determinado de tierra de labor. A propósito de la permeabilidad del suelo respecto de los gases, estudiaremos las particularidades que acompañan á sus movimientos, esto es, el lado dinámico de la cuestión. Recordemos ahora el hecho de que todos los cuerpos sólidos condensan gases en su superficie. A esta condensación se da á veces el nombre de *adsorción*, por más que es preferible reservar este nombre para el fenómeno que ocurre cuando una solución se encuentra en contacto con un cuerpo sólido capaz de modificar su concentración. Es evidente que el volumen del aire contenido en el suelo será tanto menor cuanto más apretada esté la tierra, ya sea por efecto de las condiciones naturales que hacen que, en un suelo abandonado á sí mismo, los poros se estrechan espontáneamente, ya por efecto de su apelmazamiento artificial como el debido á la acción del rodillo. Es evidente también que cuanto más agua contendrá un suelo y cuanto más la canti-

dad de ésta se acerque al límite en el cual el suelo está saturado, menos espacio libre quedará para los gases.

Así no puede apreciarse la capacidad habitual de una tierra respecto de los gases en muestras de esta tierra empapada de agua. En lo que sigue, supondremos que la proporción de agua del suelo es de 10 á 15 por 100: por otra parte, es fácil apreciar qué es lo que pasa al volumen de aire incluído en el caso en que la tierra contenga una cantidad mayor ó menor de agua; el volumen del aire y el del agua son *complementarios* para un espacio intersticial dado.

Á fin de tener una idea del volumen de los gases contenidos en un volumen determinado de tierra, tomemos un vaso metálico cúbico cuya arista tendrá una longitud de 1 decímetro, por ejemplo, y cuya capacidad será, por consiguiente, de 1000 centímetros cúbicos. Pongamos este vaso en el platilio de una balanza y tarémosle; luego, llenémosle de tierra desmenuzada, privada de los guijarros mayores. Apretemos ligeramente esta tierra mediante repetidas sacudidas, nivelemos su superficie mediante una regla y llevemos el vaso á la balanza. El peso del decímetro cúbico de tierra variará con la naturaleza de esta tierra y con su proporción de agua; supongamos, como poco más ó menos ocurre en la práctica, que el peso obtenido sea de 1,300 gramos. El volumen de nuestro vaso, esto es, 1 000 centímetros cúbicos, se compondrá: 1.° del volumen de la tierra; 2.° del volumen del agua que ésta contiene; 3.° del volumen del aire encerrado entre las partículas térreas. Admitamos que una determinación de la humedad, efectuada en una muestra de tierra idéntica á la que hemos empleado aquí, indica una proporción de agua de 10 por 100, ó sean 130 gramos de agua en la cantidad de tierra contenida en el vaso. El peso de la tierra, suponiéndola seca, se reducirá, pues, á 1 300 — 130 = 1 170 gramos. El volumen verdadero de la tierra se obtiene dividiendo 1 700 por el peso específico *real* de la tierra, que es, por término medio, 2,6; es decir, que 450 centímetros cúbicos representan el volumen de la tierra sola. Resulta, pues, que el volumen de nuestro vaso está ocupado por:

$$1000 \text{ centímetros cúb. (volumen del vaso)} = \underset{\text{(agua)}}{130^{cc}} + \underset{\text{(tierra)}}{450^{cc}} + \underset{\text{(gas)}}{420^{cc}}$$

Así, en este ensayo, la tierra aprisiona 42 por 100 de su volumen de aire. Apretando más la tierra disminuirían los espacios intersticiales; pero, en las condiciones *naturales* de apretadura, el volumen no disminuye mucho más de $\frac{1}{5}$. Este volumen es, por lo demás, un volumen normal, y el trabajo del suelo, esto es, su esponjamiento con los instrumentos de cultivo, permite aumentarlo muy sensible-

mente. Este volumen aumenta á menudo por sí solo por el hecho de que, favoreciendo la aereación los fenómenos de oxidación, la materia orgánica se quema poco á poco y desaparece dejando nuevos espacios vacíos.

Se puede evaluar el volumen gaseoso de una manera más racional valiéndose, como ha recomendado Dehérain, de un marco cúbico de palastro, sin fondo. Se hunde este cuadro en el suelo en el sitio donde quiere determinarse el grado de aereación, se hace pasar en seguida la hoja de una laya rasando la parte inferior del marco á fin de separar el cubo de tierra contenido en el mismo. Luego se pesa el conjunto (el peso del marco ya se sabe de antemano) y se continúa del modo dicho antes.

Para determinar el espacio intersticial de los suelos, Garola emplea una sonda cilíndrica de 5 centímetros de diámetro, provista de una graduación. Se introduce esta sonda en el suelo á una profundidad determinada, y luego se saca con la tierra que contiene. El volumen de esta tierra es igual á la sección del cilindro multiplicado por la altura correspondiente á la que se hundió la sonda. Si se divide el peso de la tierra seca por este volumen, se obtiene el peso de la unidad de volumen de la tierra. Es fácil deducir de esto el espacio vacío (1).

V

RELACIONES ENTRE EL AGUA Y EL SUELO

Ocupémonos ahora en el agua que circula en el suelo. Pero antes, á fin de comprender mejor los movimientos de este flúido, recordemos muy sumariamente algunos datos relativos á los fenómenos capilares.

Fenómenos capilares. Tensión superficial.—Sabido es que cuando se inmerge en un líquido capaz de mojarle un tubo de vidrio de pequeño diámetro interior, se efectúa una ascensión del líquido en este tubo. La superficie libre del mismo toma la forma de una curva cóncava por encima (menisco cóncavo). A estos fenómenos de ascensión de los líquidos en los tubos estrechos se da el nombre de *fenómenos capilares*. Las leyes de la capilaridad, ó leyes de Jurin, son cuatro:

(1) Para determinar el volumen de los espacios que hay entre las partículas de tierra, Flügge desaloja el aire de un volumen determinado de tierra mediante gas carbónico y recoge el aire desalojado en una campana que contiene lejía de potasa. — C. B.

1.ª Para un mismo líquido y para una misma temperatura, las alturas medias en los diversos tubos capilares están en razón inversa del diámetro de los tubos. Se llama *altura media* la altura de un cilindro del mismo volumen que la columna de líquido que ha ascendido.

2.ª Para un mismo líquido y para una misma temperatura, las alturas medias de las columnas no dependen de la forma del tubo capilar encima y debajo del menisco, ni de la materia de las paredes del tubo, ni de su espesor.

3.ª Á una misma temperatura, las alturas medias de las columnas en un mismo tubo capilar varían con la naturaleza del líquido.

4.ª Cuando sube la temperatura, las alturas medias de las columnas en un mismo tubo capilar disminuyen hasta anularse, ocurriendo esto en todos los líquidos. Para un líquido dado y una temperatura determinada, la tensión superficial tiene, por unidad de superficie, una fuerza constante.

En el seno de un líquido en reposo, las moléculas situadas en el medio de la masa de este líquido sufren de parte de las moléculas que las rodean una atracción que es igual en todos los sentidos: de donde resulta un estado de equilibrio. Pero las moléculas que se encuentran en la superficie misma del líquido sólo son atraídas por las moléculas subyacentes. Así, la superficie libre de este líquido está, en cierto modo, como *prensada* contra el líquido subyacente, y puede compararse esta superficie libre á una membrana elástica muy delgada, por ejemplo una membrana de caucho, que estuviese aplicada con cierta fuerza contra el líquido. Se da el nombre de *tensión superficial* á esta fuerza.

La demostración de la existencia de esta fuerza puede hacerse de muchas maneras. Así, una gota de aceite toma una forma esférica en una mezcla de alcohol y agua de la misma densidad. En estas condiciones, la gota de aceite está substraída á la acción de la gravedad. Y la esfera es el sólido cuya superficie es menor para un volumen determinado. Del mismo modo, una gota muy pequeña de agua toma la forma esférica cuando se encuentra en contacto con un cuerpo seco pulverulento, como la arena. La cohesión debida á la tensión superficial permite, entre otras cosas, explicar por qué la arena mojada es capaz, cuando se malaxa con la mano, de tomar cierta forma que pierde inmediatamente si se deseca.

Movimientos del agua en el suelo.—Estudiemos por de pronto el agua del suelo en estado estático. Considerados de la manera más general, los movimientos del agua en el suelo que no dependen de la acción de la gravedad, son determinados por la tensión superficial. Supongamos un suelo primero saturado de agüa, esto es, cuyos espacios vacíos están llenos

de este líquido. Una parte de esta agua se escurrirá por la acción de la gravedad, pero cada partícula térrea quedará rodeada de una delgada película líquida cuya tensión superficial equilibrará el efecto de la gravedad. Se sabe, además, con qué energía un cuerpo sólido cualquiera, inmergido en el agua, retiene cierta cantidad de este flúido; efectivamente, no se puede, ni mediante repetidas sacudidas, quitar toda el agua que se adhiere á la superficie del sólido. Gracias á estos efectos producidos por la tensión superficial, el agua avanza en el suelo de un punto húmedo á un punto seco, hasta que la tensión de la película situada alrededor de las partículas sea igual en todas partes. En su mayoría, las substancias salinas, solubles en el agua y utilizadas como abonos, aumentan la tensión superficial de este flúido. Cuando se emplea un abono salino, la tensión superficial aumenta en las capas de agua que reciben y disuelven este abono: y, á causa del aumento de esta tensión, el agua sube del subsuelo á las capas superiores que por esto se vuelven más húmedas. Las soluciones de materias orgánicas *(purin)* se comportan de una manera inversa, porque su tensión superficial es inferior á la del agua. En estas consideraciones corrientes Hall ha insistido particularmente.

La tierra puede cargarse de agua de dos maneras: 1.ª, si está encima de una capa arcillosa impermeable sobre la cual se extiende una capa de agua, cierta cantidad de este líquido podrá ascender en la masa de tierra en virtud de los fenómenos capilares, según vamos á ver; 2.ª, el agua puede penetrar en la tierra de arriba abajo por efecto de lluvias, del empleo de aguas de riego y del rocío y las neblinas.

Como aplicación directa de las nociones sumarias de capilaridad que acabamos de exponer, examinemos primero la ascensión del agua en el suelo. La masa del suelo, amontonada ó tomada en su estado natural, por el hecho mismo de su constitución particular, está formada por una infinidad de canales independientes ó anastomosados entre sí.

Ascensión capilar en el suelo.—Es evidente que estos canales, de calibre variable, no tienen paredes regulares y no

siempre son verticales. Su diámetro es muy desigual, salvo tal vez en el caso, muy raro, de una extremada homogeneidad de materia. Tratándose de un elemento particular del suelo, por ejemplo la arena, mediante un tamizado cuidadoso se pueden aislar granos de tamaño poco más ó menos igual. Luego se buscará, para una arena de determinada dimensión, á qué altura se eleva el agua en su masa cuando se introduce en ella un tubo de vidrio lleno de la misma arena y tapado en su parte inferior por un trozo de tela. Estudiemos con atención los fenómenos que se observan cuando el agua sigue así una marcha ascendente, y cuáles son las particularidades que se observan cuando varía el grado de finura de los granos.

Si suponemos que una tierra en el sitio donde naturalmente se halla está por su base en contacto con una capa de agua, ésta se elevará en su masa á una altura tanto mayor cuanto más finos sean sus elementos. Pero, si esta ascensión es mayor en los suelos de elementos finos que en los que están formados por elementos gruesos, la *velocidad* con que el agua sube será tanto menor cuanto menores sean las dimensiones de los elementos. Es preciso, en efecto, tener en cuenta el obstáculo debido al *roce* que experimenta el agua con el contacto de las partículas sólidas que forman los canales del suelo. Este roce es tanto mayor cuanto más finos son los granos y, por consiguiente, cuanto más estrechos son los canales capilares. El agua sube tanto más aprisa, siendo iguales las demás circunstancias, cuanto más elevada es su temperatura, ó sea, doble aprisa á 25° que á 0°; pero, por otra parte, la altura á que llega es tanto menor cuanto mayor es la temperatura. Las soluciones salinas cuya viscosidad específica es inferior á la del agua, suben en el suelo más aprisa que el agua pura, é inversamente. Resulta de lo que antecede que, en los suelos trabajados, esto es, aquellos cuyos espacios capilares están más ó menos profundamente destruídos, la ascensión del agua es siempre menor que en los suelos naturales ó artificialmente apretados.

En la práctica no debe exagerarse la importancia de la ascensión del agua en los suelos. Es evidente que las ventajas que se pueden sacar, desde el punto de vista de la humedad necesaria á las raíces,

de esta subida del agua están subordinadas por de pronto á la existencia de una capa de agua persistente á cierta profundidad y, luego, á la distancia á que se halla esta capa de la superficie del suelo. Si la capa de agua es muy profunda, la ascensión del líquido no podrá alcanzar más que una escasa altura en una arena de elementos gruesos y, por consiguiente, no podrá llegar á la región en que se encuentran las raíces superficiales de ciertas plantas. Si el suelo está formado por elementos muy finos, esta elevación del agua será mucho más considerable, pero se efectuará la subida tan lentamente, por efecto del roce, que con frecuencia no podrá bastar á las necesidades de las plantas en cuyas hojas se efectúa una activa transpiración. Un suelo de esta naturaleza es, pues, prácticamente impermeable al agua procedente de capas profundas. Si se supone que un suelo está constituído por una serie de capas horizontales cuyos elementos son de tamaños desiguales, el movimiento del agua en el interior de este suelo será tanto más acentuado cuanto más pronunciada sea la desigualdad de los elementos de estas diversas capas: las de granos finos quitarán agua á las que tienen los elementos más gruesos.

En resumen, la ascensión del agua en los capilares del suelo es tanto mayor cuantas más partículas finas éste posea, ofreciendo, en consecuencia, para un volumen dado, la mayor superficie posible. Esta ascensión disminuye cuanto aumenta la proporción de los elementos gruesos. De una manera general puede decirse que la presencia del aire en el suelo dificulta el movimiento del agua. Cuando el suelo es muy seco, la ascensión del agua procedente de las capas profundas se efectúa á veces con alguna dificultad, porque el aire interpuesto entre las partículas sólidas constituye un obstáculo para el movimiento ascensional de este líquido.

Infiltración del agua. Capacidad del suelo respecto del agua.—Cuando el agua (de riego ó de lluvia) llega al suelo, entra poco á poco en los espacios libres y progresa de arriba abajo; se dice entonces que hay *infiltración del agua.* Examinemos qué relaciones existen entre este flúido y los elementos sólidos con que se encuentra en contacto.

Se pueden distinguir *a priori* dos especies de capacidades del suelo para el agua. Se puede llamar *capacidad máxima* la correspondiente al caso en que todos los espacios intersticiales están llenos de líquido, tanto los espacios que hay entre las partículas como las cavidades ó *poros* que se encuentran en el interior de éstas. Se puede suponer también que la totalidad del aire que contienen los espacios intersticiales y los poros haya sido expulsada por la llegada del agua. La *capa-*

cidad mínima para el agua corresponde al caso en que los espacios intersticiales son vacíos, y en que la sola humedad de los elementos es imputable á la presencia de una película líquida muy delgada que recubre cada partícula á la superficie de la cual está retenida por la fuerza que hemos llamado *tensión superficial.* Además, los *poros* quedan llenos de agua cuando este líquido ha expulsado el aire; los canales capilares que representan estos poros son tan estrechos, generalmente, y su longitud es tan corta, que el agua queda aprisionada en ellos aun cuando la tierra haya escurrido completamente. Schlœsing considera que esta capacidad mínima representa la *dosis de agua normal* que contiene un suelo determinado.

Cuando un suelo está empapado de agua, todos los espacios intersticiales están ocupados por este líquido. Pero, paulatinamente, por la acción de la gravedad, los espacios huecos comprendidos en la parte superior de la tierra considerada se vacian, y esta región no presenta, finalmente, más que la *capacidad mínima,* mientras que los espacios intersticiales inferiores siguen llenos en una altura que depende del calibre de los canales capilares formados por las partículas térreas. Cuanto más finos sean los elementos constitutivos del suelo, más estrechos serán estos capilares; por consiguiente, mayor será la altura de tierra que presentará la capacidad máxima, é inversamente. Además, para un volumen determinado de tierra, la superficie de los elementos (suponiéndolos esféricos é iguales) será tanto mayor cuanto más pequeños sean. De manera que la *capacidad mínima* corresponderá á una proporción de agua, para 100 partes de tierra, tanto mayor cuanto más finos sean los elementos. Volveremos á ocuparnos en estos diferentes puntos á propósito de las propiedades físicas de las tierras. Se pueden expresar aproximadamente las capacidades máxima y mínima de un suelo para el agua mediante las siguientes cifras que indican el agua absorbida por 100 partes de materia suponiéndola seca:

Tierra franca	50	29
» arcillosa.	98	56
Arena gruesa	45	18
Tierra arenohumífera	155	116 (según Hall).

Resulta de lo que se acaba de decir que la estructura del suelo desempeña un papel capital en el almacenamiento del agua, porque del tamaño de las partículas depende el peso de este líquido que es capaz de retener la tierra. Pero, en las condiciones naturales, un suelo, por homogéneo que parezca, contiene siempre partículas de tamaños extremadamente variables. Los diámetros de los tubos capilares que surcan este suelo son muy desiguales. Conviene recordar nuevamente que el suelo casi siempre es una mezcla de una cantidad variable de guijarros y cascajo, de dimensiones relativamente considerables, como también de granos de arena fina en el seno de la cual están incluídos estos elementos gruesos. A causa de ciertos movimientos interiores que siempre experimenta, el suelo está atravesado por hendiduras más ó menos anchas; además, la descomposición de los restos vegetales de toda suerte, debida á acciones químicas y microbianas, forma espacios vacíos que destruyen la continuidad de la masa de tierra.

Existen, pues, tantas causas que modifican la homogeneidad física aparente del suelo, que no puede hacerse ningún cálculo que tenga algún valor cuando se trata de apreciar de una manera exacta, ya sea la capacidad máxima, ya la capacidad mínima de un suelo respecto del agua. Por otra parte, si la capacidad máxima corresponde á un caso real, aquel en que, á causa de lluvias muy abundantes, todo el aire contenido en un suelo ha sido expulsado por el agua – circunstancia muy desfavorable para la respiración de las raíces – la capacidad mínima, por el contrario, distá mucho de estar tan bien definida. En realidad, existen variaciones continuas en la cantidad de agua de un suelo dado, principalmente en la proximidad de su superficie. Las causas procedentes del exterior susceptibles de producir cambios notables y á menudo rápidos en el grado de hidratación de esta superficie, son: la agitación del aire, el calentamiento ó el enfriamiento de la atmósfera ambiente, el estado higrométrico de ésta, las lluvias, la condensación del rocío.

El tamaño de las partículas ejerce una influencia considerable en la pérdida de agua que experimenta un suelo en determinadas condiciones. Volveremos á este tema á propósito de la aptitud de las tierras á la desecación. Entre la cantidad máxima de agua de que puede cargarse un suelo determinado y la cantidad mínima definida como antes, existe una multitud de estados intermedios de hidratación. Lo que importa conocer es la cantidad de agua encima y debajo la cual una planta no puede vivir: en el primer caso, á causa del

volumen demasiado pequeño de aire que se halla en contacto con las raíces; en el segundo, por efecto de un aprovisionamiento insuficiente de este líquido. Se admite que la cantidad de agua óptima para los vegetales corresponde al estado en que el suelo contiene de 40 á 60 por 100 de la cantidad necesaria para llenar de este líquido todos los espacios intersticiales. Los trabajos de cultivo á que se somete un suelo aumentan mucho su capacidad para el agua y para los gases; si se remueve mucho un suelo con los instrumentos de labranza, aumenta de volumen aparente y, por efecto de la destrucción momentánea del estado de apelmazamiento en que le han dejado los cultivos anteriores, se multiplican los huecos interiores que permiten así al agua de lluvia alojarse más fácilmente en los espacios artificialmente formados. Es inútil insistir más en este punto, por otro lado muy importante, y sobre la necesidad de labores profundas cuyos beneficios han sido reconocidos en todo tiempo. Recíprocamente, la compresión natural que experimentan las tierras abandonadas á sí mismas ó la que las hace experimentar el rodillo—cuando se quiere reducir el número y la capacidad de los espacios vacíos con objeto de provocar la ascensión del agua de las partes profundas hacia la superficie por la formación de canales capilares—estas dos suertes de apelmazamiento, decimos, disminuyen mucho la facultad de almacenamiento por el suelo de las aguas de lluvia.

El movimiento del agua procedente de las capas bajas hacia la superficie, cuando el suelo está bien apisonado, esto es, cuando sus canales capilares se han estrechado, y la dificultad, por el contrario, que experimenta el agua á progresar en una tierra ablandada, quedan de manifiesto mediante el siguiente experimento clásico. Se pone en un plato un gran trozo de azúcar en cuya cara superior se amontona cierta cantidad de azúcar en polvo, y en seguida se vierte en el plato agua coloreada. La ascensión del líquido, visible por su coloración, es rápida en el trozo de azúcar cuyos espacios capilares son muy finos. Pero, tan pronto como este líquido llega á la cara superior del trozo de azúcar y entra en contacto con el azúcar pulverizado, la ascensión es mucho más lenta y sólo se propaga con extremada lentitud; los capilares del azúcar pulverizado son incomparablemente más anchos que los del trozo de azúcar que hay debajo.

Permeabilidad del suelo.—El agua no puede descender á través del suelo más que cuando éste presenta cierto grado de porosidad ó, empleando la expresión acostumbrada, de permeabilidad. Se puede definir la permeabilidad de la siguiente manera: es la velocidad con que un volumen de agua dado, de altura determinada, se introduce en el suelo. La palabra *permeabilidad* será para nosotros sinónimo de facilidad con que el agua avanza en un suelo de arriba abajo.

Una medida exacta de la permeabilidad, en el caso de un suelo donde naturalmente se halla, es difícil de encontrar, porque la homogeneidad de la masa nunca es bastante perfecta para que se obtengan los mismos resultados en diferentes puntos del suelo. Se ha propuesto, á veces, utilizar, para esta medida, un marco de palastro análogo al que ya nos sirvió para estudiar las dimensiones de los espacios libres en cierto volumen de tierra. Se hunde el marco algunos centímetros en el suelo, siempre los mismos, y se vierte agua sobre una capa conocida. La rapidez con que el agua desaparece representa el grado de permeabilidad del suelo. Pero, á causa de la heterogeneidad de la masa térrea, pueden existir en ella hendiduras, grietas, rajas, espacios vacíos por la podridura de las raíces, galerías de gusanos, que, sin ser muy anchas y aun sin poderse ver á simple vista, aumentan mucho la permeabilidad aparente y hacen desaparecer más aprisa la masa de agua que tienen encima que si la parte del suelo donde se hace el ensayo fuese más homogénea. Se comprende que el agua, que entonces se infiltra rápidamente, no moja más que una parte á menudo limitada de tierra en detrimento de otra parte más compacta. En general, el agua penetra fácilmente en los espacios no capilares y es débilmente retenida en ellos. Los suelos puramente arenosos y, por consiguiente, bastante homogéneos en su estructura, son aquellos que se humedecen con más uniformidad. En el caso de la arcilla, la permeabilidad aumenta en grandes proporciones cuando la tierra contiene sales cálcicas cuyo poder coagulante conocemos.

Ante todo, notemos un primer obstáculo que se opone á la penetración del agua. Por efecto de la sequedad, las capas superiores del suelo se deshidratan más ó menos profundamente. Cuando llueve, el agua es arrastrada suelo adentro por la gravedad, pero la capa de aire más ó menos gruesa que contiene la parte superior de la tierra deberá ser apartada primero; esta capa forma un obstáculo muy serio para el descenso del agua. Ocurre entonces que el agua puede permanecer en gran parte en la superficie del suelo durante bastante tiempo, y aun convertirse en vapor si la temperatura es elevada. Por lo tanto, si la duración de esta lluvia es corta, podrá ser que la vegetación no saque de ella más que pequeñas ventajas. Por el contrario, la penetración del agua es mucho más fácil cuando el suelo ya está húmedo.

La permeabilidad de una tierra, suponiéndola homogénea, depende ante todo del diámetro de sus canales capilares y de la altura de la capa de agua que hay encima de ella.

Poisseuille ha establecido algunas leyes de las que resulta que: la velocidad de salida en tubos de pequeño diámetro es proporcional á la presión, en razón inversa de la longitud de los tubos y proporcional al cuadrado de su diámetro.

La cantidad de agua que, en la unidad de tiempo, sale á través de un suelo depende esencialmente de los espacios vacíos que éste presenta: la estructura del suelo tiene una importancia mayor cuando se trata de la penetración del agua. Esta varía, pues, en cada suelo y, respecto de un mismo suelo, con su grado de apretadura. Hemos expuesto antes (pág. 123) la influencia del rozamiento en la velocidad de ascensión del agua. Volvemos á encontrar aquí esta misma influencia en sentido inverso, porque la cantidad de agua que penetra en el suelo de arriba abajo depende igualmente de la intensidad del roce de esta agua con las paredes de los tubos capilares; la velocidad de la penetración del líquido es tanto menor cuanto más estrechos son los capilares. El rozamiento del agua es considerable en las partículas de arcilla cuyos granos son muy finos; por esto la permeabilidad de la arcilla en sí es muy pequeña (1).

Según Garola, la influencia del apisonado de la arcilla en la permeabilidad ofrece particularidades dignas de mención. Supongamos una tierra que contenga 69 por 100 de arcilla, constituyendo una arcilla natural casi pura, con 50 por 100 de espacios vacíos. Si se hace igual á 1 la permeabilidad de esta tierra evaluada en volumen de agua escurrida en la unidad de tiempo, con la unidad de presión, en unidad de superficie y unidad de espesor, y se compara esta tierra con muestras de suelos de riqueza en arcilla decreciente, pero de espacio vacío constante, se encuentra que la permeabilidad llega al doble cuando la riqueza de la arcilla es sólo de 25 por 100, quíntuple con el 6 por 100 y séxtuple con el 4 por 100. Resulta que la permeabilidad disminuye primero rápidamente cuando la proporción de arcilla experimenta pequeños aumentos. La disminución de la permeabilidad es aún bastante rápida para una proporción de arcilla comprendida entre 10 y 30 por 100; pero, más allá de 30 por 100, la impermeabili-

(1) En un ensayo comparativo de permeabilidad para el agua que hice con dos tierras, que contenían respectivamente 13,11 y 23,1 por 100 de arcilla (determinada por el procedimiento de Schlœsing), siendo por lo demás muy semejantes y operando en igualdad de circunstancias, en la primera, al cabo de 24 horas, el agua se escurría ya por la parte inferior del tubo empleado, mientras que en la segunda tardó 12 días.—C. B.

dad sólo aumenta con mucha lentitud á medida que va creciendo la proporción de arcilla.

En las condiciones naturales, se concibe que la velocidad de la penetración del agua sea bastante variable, aun cuando no se examine más que una pequeña extensión de terreno. Porque, en unos sitios, el agua no hallará más que espacios estrechos y su paso será tanto más lento cuanto menor sea el diámetro de los tubos capilares; en otros sitios, se deslizará rápidamente á través de grietas ó rendijas que sólo ofrecerán á su paso un obstáculo fácil de vencer. De suerte que la dosis de humedad del suelo no llega á ser uniforme más que al cabo de un tiempo á veces bastante largo.

La presencia de ciertas sales aumenta la permeabilidad del suelo. – La presencia de sales cálcicas (cloruro, nitrato, sulfato, superfosfato) favorece el mullido y aumenta la permeabilidad del suelo. La sal marina, á la fuerte proporción de 10 por 100, aumenta la permeabilidad; la cantidad de esta sal necesaria para provocar la coagulación de la arcilla es mucho mayor que si se trata de los cloruros de calcio ó de potasio. Si las proporciones de sal marina son escasas, hay disminución de permeabilidad (acción de la sosa). El nitrato sódico en pequeña proporción disminuye la permeabilidad; no produce efecto en la arcilla suspendida en el agua destilada, aun en la proporción de 13 gramos por litro. El sulfato y el fosfato sódicos se conducen del mismo modo; el carbonato sódico aun posee una acción más marcada. Las sales sódicas son, en realidad, agentes de descoagulación de la arcilla; en cambio, las sales potásicas correspondientes aumentan la permeabilidad del suelo. El cloruro y el sulfato magnésicos, así como el sulfato amónico, cuya nitrificación origina el nitrato cálcico, se comportan como las sales potásicas (Garola).

Infiltración del agua bajo presión. – Si se dispone una capa de agua de variable altura sobre una columna de arena cuyos granos son de dimensiones variadas, la cantidad de agua que pasará á través de la arena al cabo de un tiempo dado será tanto mayor, para un mismo tamaño de los granos y una misma altura de agua, cuanto menor sea la altura de la columna de arena. Cuanto más alta es ésta, mayor es la cantidad de agua que la atraviesa en un tiempo determinado, siendo la arena de granos de determinado tamaño. Cuanto mayores son los granos, á igualdad de altura de agua y de arena, mayor es la cantidad de agua escurrida.

Movimientos del agua del suelo en contacto con substancias salinas solubles.—La distribución del agua en el suelo, á lo menos en las capas más superficiales, es sencillamente homogénea si se supone homogénea la estructura de estas capas superficiales. Desde el punto de vista práctico, importa especialmente estudiar estas capas porque las visitan las raíces de las plantas, ya durante todo el período de su vegetación si estas raíces son rastreras, ya sólo en el primer período de su evolución si son penetrantes. Además, las capas superficiales de tierra reciben los abonos directamente. Cuando se distribuye, en las condiciones ordinarias del cultivo, una substancia salina sólida pero soluble (nitrato sódico, sulfatos amónico, potásico, etc.), se establece una repartición especial del agua por el hecho de la presencia de la sal soluble empleada. Los notables fenómenos que entonces ocurren, y cuyo interés teórico y sobre todo práctico es considerable, han sido muy bien puestos de manifiesto por Müntz y Gaudechon (1908). He aquí un resumen de los resultados á que han llegado estos autores.

Parece á primera vista que, cuando se esparce en la superficie de una hectárea una dosis ordinaria de 200 á 300 kilogramos de uno de los abonos salinos antes citados, la cantidad de agua que contiene normalmente el suelo es más que suficiente para disolver de un modo completo un peso de materia salina tan pequeño respecto al del agua total que impregna la tierra. Si, en efecto, suponemos una proporción de humedad del 3 por 100 solamente, repartida en un espesor de tierra de 30 centímetros de altura en la superficie de una hectárea, el volumen total del agua contenida en esta tierra será de 90 metros cúbicos. Si la tierra contiene una mayor cantidad de agua á causa de la lluvia, la proporción de agua del suelo puede llegar á quintuplicar y á decuplicar. Pero, si bien esta cantidad total de líquido es más que suficiente para disolver el peso total de los abonos salinos, es preciso notar, cuando se considera el suelo, que no se trata propiamente del agua líquida, sino del agua que recubre cada partícula térrea de una película delgada. De manera que, á menos de suponer que la mezcla de la tierra con el abono salino sea completamente perfecta, y que éste haya sido empleado en su máximo de división, circunstancias que nunca pueden ocurrir todas, es evidente, *a priori*, que el depósito de una materia salina soluble en la superficie de una tierra romperá el equilibrio de la primitiva distribución del agua en la superficie de esta tierra. En realidad, cada grano de sal—y no

todos los granos de sal tienen las mismas dimensiones—al llegar al suelo, queda rodeado de una zona térrea de un diámetro mayor ó menor no tocada por esta sal. Tomemos tierras de diversa naturaleza que no hayan recibido aguas meteóricas desde algún tiempo y que se han desecado al aire. Como hacen observar los citados autores, este estado de sequedad relativa corresponde á una proporción de humedad que puede variar de 1 á 2 por 100 en los suelos ligeros, de 15 á 20 por 100 en las tierras fuertes ó en las tierras humíferas. Incorporemos á estas tierras un cristal de nitrato sódico ó de cloruro potásico. Al cabo de algunas horas ó de algunos días, aparece una mancha húmeda en el sitio del depósito, lo que se reconoce por la aparición de un tinte más obscuro y por una sensación especial que se nota al tacto. Esta mancha persiste, se agranda poco á poco y, al cabo de bastante tiempo, su aspecto húmedo contrasta con el resto de la tierra que presenta los caracteres de una tierra seca. Una muestra de tierra tomada en el seno de estas manchas es mucho más rica en agua que una muestra tomada fuera de ellas: en este último sitio, la tierra es seca. El agua se ha dirigido hacia la sal primero, hacia la solución salina después. En el interior de la tierra situada debajo del grano de sal, la masa húmeda ha tomado una forma aproximadamente esférica.

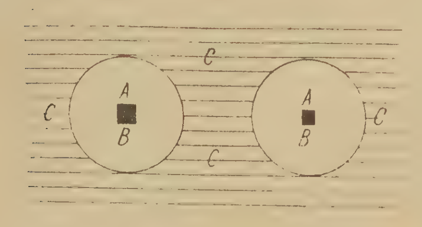


Fig. 3.

AA, sitio donde ha sido depositada la sal; *BB*, zona mojada por la solución salina; *CC*, tierra intermedia desecada.

He aquí un ejemplo de la distribución del agua en presencia de una sal: Una tierra silícea con 3,2 por 100 de agua, puesta en una caja cuadrada de 30 centímetros de lado y 15 de profundidad, ha recibido en 4 puntos equidistantes un cristal de nitrato sódico que pesa 5 decigramos. Se ha cubierto luego la caja con una lámina de vidrio. Al cabo de ocho días, el diámetro de las manchas era de 30 á 40 milímetros, la proporción de humedad era de 5,3 por 100 en la tierra de las manchas y de 2,6 por 100 en la tierra fuera de ellas. Cualquier sal soluble se comporta de la misma manera.

Resulta de este experimento que la substancia salina no tiene tendencia alguna á difundirse y que la falta de homogeneidad en la distribución del agua en el suelo, ocasionada por la presencia de la sal, tiende á persistir. Una consecuencia práctica se deriva de los hechos anteriores. Si se siembran simientes en un suelo que presenta las zonas alternadas de desecación y de saturación salina que acabamos de describir, puede que no se efectúe la germinación: la semilla

que se halla en contacto con una solución relativamente concentrada de una sal cualquiera no germinará; la que haya caído en una porción de tierra desecada tampoco germinará, porque no tendrá á su disposición suficiente cantidad de agua.

Si en vez de tratarse de una tierra seca, se opera en una tierra que contenga mayor proporción de agua, se observan los hechos siguientes: En una tierra silícea ligera, con 17,5 por 100 de agua, puesta en un cristalizador de 11 centímetros de diámetro, se introducen, á 1 centímetro de profundidad, 2 gramos de nitrato sódico cerca de uno de los bordes del cristalizador. Al cabo de tres días, se toma una muestra de tierra á una profundidad de 2 centímetros, debajo del punto donde se puso la sal, luego otra muestra del medio del cristalizador á 25 milímetros del primer punto, después otra en el borde opuesto del cristalizador á 50 milímetros del primer punto: se comprueba que la sal no ha llegado á ninguno de los dos últimos puntos y que no ha habido difusión salina.

En el mismo tipo de tierra (con 16,5 por 100 de humedad), y mediante un experimento fácil de imaginar, no se observa, al cabo de tres días, ninguna difusión salina en sentido vertical; la sal que está comprendida entre dos capas de tierra no avanza hacia arriba ni hacia abajo, en una distancia de 40 milímetros del punto en que fué colocada. Müntz y Gaudechon enseñan, además, que si las tierras son mojadas por el agua de lluvia, y después se secan más ó menos, no existe ya atracción del agua hacia el punto en que fué depositada la sal; pero la difusión de la sal, aun en estos suelos húmedos, es casi nula durante mucho tiempo y no se hace apreciable más que después de muchas semanas y aun de muchos meses: existen, pues, aun en estas tierras, unas zonas ricas en sal y otras desprovistas de ella. La difusión salina sólo ocurre cuando, por una fuerte compresión, se aproximan las partículas térreas destruyendo la discontinuidad que existe siempre en una tierra disgregada. Si, además, la tierra está empapada de agua, el medio se vuelve continuo, la difusión salina se efectúa, pero menos rápidamente que en el seno de una masa líquida.

La caída de la lluvia no acelera mucho la difusión de las sales: éstas avanzan simplemente de arriba abajo.

En resumen, la discontinuidad de la tierra de labor, con espacios vacíos llenos de gas, constituye un obstáculo muy serio para la repartición uniforme de una materia soluble, aun en el caso de que la cantidad de agua contenida en el suelo considerado ó la que le llevan las lluvias ó los riegos sea incomparablemente mayor que la cantidad necesaria para la disolución de la materia salina de que se trata.

Era útil señalar aquí una nueva prueba de la falta de

homogeneidad de la tierra de labor para hacer ver, una vez más, con qué dificultades se tropieza al estudiar los movimientos del agua y de los gases que circulan en el suelo.

Afinidad del agua para ciertos elementos del suelo. —El poder especial que posee la tierra de retener el agua y aun de quitarla á ciertos cuerpos, aparece muy claramente en el fenómeno de la germinación. Sabido es que una semilla no puede germinar más que cuando ha absorbido cierta cantidad mínima de agua. Cuando esta semilla se encuentra en el estado de vida adormecida, contiene una dosis de agua normal que varía de 5 á 15 por 100. Esta dosis sufre fluctuaciones, en más ó en menos, según el estado higrométrico de la atmósfera ambiente.

Supongamos una semilla enterrada en un suelo cuya proporción de agua sufrirá las variaciones naturales, como ocurre en las condiciones ordinarias del cultivo, ó en un suelo en donde se produzcan á voluntad estos cambios en el grado de hidratación. ¿Cómo se establecerá la lucha por el agua entre el suelo y la semilla? Este problema ha sido recientemente estudiado por Müntz (1910). En razón de su interés práctico, este problema requiere algunas aclaraciones.

Los granos de trigo con que ha operado el autor tenían una humedad primitiva de 14 por 100; germinaban cuando habían absorbido bastante agua para que la proporción de este líquido fuese á lo menos de 36 por 100. A la temperatura de 11°, inmergidos en agua, estos granos absorbían, en veinticuatro horas, 34 por 100 de agua, sin contar con la que ya contenían, y 47,9 por 100 al cabo de cuarenta y ocho horas. Aquí, no existe la lucha por el agua, porque este líquido se encuentra libre.

2 gramos de estos granos fueron sembrados en 2 kilogramos de tierra. En una tierra de jardín con 2,96 por 100 de agua, estos granos no habían absorbido, al cabo de ciento noventa y dos horas, más que 2,36 por 100 de este líquido, cantidad insuficiente para asegurar la germinación. A pesar de la presencia de 59 gramos de agua en la totalidad de la tierra, los granos no han podido apoderarse de los 45 centigramos de agua necesarios para su germinación. Cuando esta misma tierra fué llevada á 13,59 por 100 de agua, los granos absorbieron 29,39 por 100 en cuarenta y una horas: el límite de saturación de la tierra respecto del agua había sido pasado,

los granos han podido absorber una cantidad de agua suficiente para su germinación.

Como la afinidad de la tierra para el agua reside casi en totalidad en la arcilla y el humus que contiene, la influencia de estos factores ha sido examinada especialmente por Müntz.

Al cabo de seis días, he aquí cuáles fueron las pérdidas ó ganancias de agua de los granos de trigo en tierras que contenían proporciones variables de arcilla:

I. Arcilla por 100 de tierra = 2,35		II. Arcilla por 100 de tierra = 5'61		III. Arcilla por 100 de tierra = 13,22	
Agua por 100 en la tierra	Pérdida ó ganancia de agua por 100 de granos	Agua por 100 en la tierra	Pérdida ó ganancia de agua por 100 de granos	Agua por 100 en la tierra	Pérdida ó ganancia de agua por 100 de granos
0	— 7,65	0	— 7,35	0	— 11,25
0,67	— 0,95	1,41	— 0,87	2,56	— 0,70
1,93	+ 16,35	2,60	+ 6,40	3,70	+ 0,90
2,50	+ 29,10	4,15	+ 27,20	7,73	+ 31,15

Estas cifras demuestran que la germinación se ha realizado en la tierra menos rica en arcilla cuando ésta contiene sólo 2,50 por 100 de agua; ha sido necesario 4,15 por 100 de agua para llegar al mismo resultado en la segunda tierra, y 7,7 por 100 de agua en el caso de la tierra más arcillosa.

Los resultados que se obtienen con el humus son todavía más interesantes:

Tierra muy ligera.		Mantillo de jardinero	
Agua p. 100 en la tierra	Pérdida ó ganancia de agua p. 100 de granos	Agua p. 100 en la tierra	Pérdida ó ganancia de agua p. 100 de granos
0,10	— 3,65	0,89	— 4,50
0,52	+ 19,87	4,71	— 1,98
1,16	+ 24,72	6,70	+ 6,04
3,49	+ 37,41	13,38	+ 12,45
4,27	+ 39,76	16,42	+ 17,36
—	—	18,96	+ 21,55
—	—	22,30	+ 23,86
—	—	26,98	+ 26,63
—	—	31,10	+ 28,51

Así, cuando una tierra muy ligera no contiene más que 0,52 por 100 de agua, el grano de trigo encuentra en ella una cantidad suficiente de este líquido para germinar; la germinación del grano no está asegurada en el mantillo más que cuando su proporción de agua llega á 19 por 100.

Müntz ha examinado también lo que ocurre cuando, después de haber inmergido el grano en el agua para permitirle absorber los 35 por 100 de este líquido indispensables para su germinación, se lleva en seguida á la tierra. ¿En qué sentido se llegará al equilibrio? ¿Cederá el grano agua al suelo ó se efectuará lo contrario?

Al cabo de cuatro días de contacto de los granos así hidratados con suelos de diversa proporción de arcilla, se han obtenido los siguientes resultados: las cifras de la segunda columna de cada muestra indican el agua que queda en el grano á más de la humedad natural de 14 por 100:

I		II		III	
Agua en 100 de tierra	Agua que queda en 100 de granos	Agua en 100 de tierra	Agua que queda en 100 de granos	Agua en 100 de tierra	Agua que queda en 100 de granos
0	5,90	0	4,10	0	2,1
0,67	11,20	1,41	11,0	2,56	10,8
1,55	18,60	2,20	13,20	3,20	11,9

Resulta, pues, que la tierra, cuando no está satisfecha su afinidad para el agua, quita este líquido al grano previamente inmergido.

En resumen, la semilla no puede germinar más que cuando queda agua *disponible* en la tierra después que ésta, según su naturaleza, ha satisfecho primero sus afinidades respecto del agua. Se ve, pues, qué interesantes problemas suscitan estos fenómenos del aprovisionamiento del agua en el suelo, de su circulación, de su atracción por las partículas sólidas, cuando se trata de resolver la cuestión del esparcimiento de los abonos ó de sembrar las semillas en una tierra de labor.

V

COLOIDES DEL SUELO

El estudio de la constitución del suelo, tal como acabamos de presentarla, sería incompleto si no considerásemos las diferentes formas, ó mejor *los diferentes estados físicos* en que pueden presentarse algunos de sus componentes. Hemos llamado ya la atención respecto de que, por efecto de la circulación del agua y del gas carbónico entre las partículas térreas, los elementos de la roca experimentaban una descomposición más ó menos profunda. Estos fenómenos de des-

composición conducen á la producción de substancias, algunas de las cuales se disuelven en el agua y forman, por consiguiente, un medio homogéneo con este líquido. Pero otras substancias, procedentes también de procesos de descomposición, no entran en disolución verdadera; quedan en estado de suspensión muy fina en el agua que las impregna y originan falsas soluciones, de las cuales la arcilla, que hemos llamado *coloidal*, antes estudiada (pág. 106), representa uno de los tipos más comunes y más perfectos. Se llaman á menudo *micelas* (de *mica*, migaja) las partículas de substancia que quedan así en suspensión en el seno de un líquido, á pesar de la acción de la gravedad. La arcilla no es la única materia que se halla en el suelo que sea capaz, en las condiciones ya explicadas, de dividirse en el seno del agua sin disolverse en ella y de afectar una forma micelar. El suelo contiene hidrato férrico, hidrato de aluminio, sílice, humus coloide, así como diversos silicatos que, por la acción de los electrolitos (sales disueltas), pueden perder momentáneamente este estado de suspensión y precipitarse en forma de copos sin ninguna estructura geométrica. Cuando el estado de suspensión cesa, se dice que hay *coagulación*. Recordamos que la materia en suspensión recibe el nombre de *sol;* se dice, por ejemplo, un *hidrosol* de ácido silícico; se llama *gel* la materia coagulada: *hidrogel* de ácido silícico. Inversamente, cuando, por tal ó cual influencia, el electrolito, causa de la precipitación, desaparece, la materia cuya precipitación había ocasionado podrá ponerse en suspensión ó en *seudosolución* en el agua.

El ejemplo de la arcilla es característico en este concepto. Sin embargo, no debe olvidarse que la coagulación arrastra siempre indicios del electrolito que ha producido este fenómeno. Estos indicios no pueden ser quitados al coágulo más que mediante prolongadas lociones; pero pueden ser *desalojados* mediante lavados con agua que contenga otros electrolitos.

Los coloides retienen siempre una gran cantidad de agua y su estado especial de suspensión no subsiste más que á causa de la existencia de este exceso de líquido que rodea á

las micelas. Algunos de ellos pueden, en efecto, coagularse espontáneamente. Graham demostró, hace mucho tiempo, que una seudosolución, por ejemplo de sílice, tiene una relativa estabilidad cuando su concentración no pasa de 1 á 2 por 100; si la concentración es mayor, puede ocurrir una coagulación espontánea al cabo de algunas horas ó de algunos días.

Cuando la coagulación es completa, muchos coloides, la sílice en particular, pueden volver al estado de suspensión micelar si se les añade una cantidad de agua suficiente. Pero esta operación no da resultado más que si no se deja pasar mucho tiempo después de terminada la coagulación, de otro modo el coágulo queda definitivamente insoluble. En efecto, el nuevo estado molecular que afecta se modifica entonces de tal manera, que la *reversibilidad* del fenómeno ya no es posible.

Así, la sílice es capaz de existir en forma micelar en suspensión en el agua, y esta seudosolución es apenas turbia; esta misma sílice, en el momento de su coagulación espontánea, ocupa aún un volumen considerable, y el líquido en que se coagula pierde mucho de su transparencia; por último, al cabo de algunos días de reposo, esta sílice se va reuniendo poco á poco, como una esponja empapada de agua cuando se la exprime, y se separa del líquido en el seno del cual antes se hallaba suspendida. Todas estas variaciones representan diferentes estados de la molécula SiO^2, en grados de condensación cada vez más avanzados; pero, como se admite hoy generalmente, no se encuentran en ninguno de ellos combinaciones definidas entre el agua y el cuerpo sólido. Dicho en otros términos, no existen hidratos silícicos. La sílice cristalizada, el *cuarzo*, puede ser considerado como la molécula elemental de la que derivan por polimerización las otras formas incapaces de cristalizar.

Estudiaremos más tarde, á propósito del poder absorbente de los suelos, la singular propiedad que tienen los coloides de combinarse con gran número de substancias salinas indispensables á los vegetales. Estas combinaciones, llamadas por van Bemmelen *combinaciones de absorción*, no parece que se formen, por lo general, en pro-

porciones definidas. El hecho de que una substancia en seudosolución, y que se precipita en contacto con los electrolitos, retenga siempre, según hemos dicho antes, cierta cantidad de estos electrolitos, permite también explicar por qué el coloide que se coagula puede aprisionar muchas sales útiles á los vegetales. Estos coloides, por ejemplo la sílice, son capaces de descomponer los carbonatos ó los fosfatos y de retener una parte de la base de estas sales, determinando la formación de bicarbonatos ó de fosfatos ácidos. Graham ha hecho ver que los silicatos así formados se disociaban por efecto de la diálisis con separación del ácido y de la base. Dada la variedad de los fenómenos químicos que se efectúan en el suelo, y cuya naturaleza cambia en cada momento á consecuencia de los movimientos del agua y del ácido carbónico, es fácil concebir que ciertos componentes de la tierra, tanto minerales como orgánicos, toman el estado coloidal y en seguida lo pierden á causa de la presencia de los electrolitos coagulantes.

Esta coagulación tiene por resultado producir sobre los cascajos puramente silíceos una especie de revestimiento arcilloso y húmico que se puede hacer desaparecer por un tratamiento, primero con una solución de ácido oxálico y después con amoníaco, como ha demostrado J. Dumont.

Fenómenos de adherencia.—Á propósito de esta adherencia particular de ciertas materias minerales y orgánicas á los granos de arena, es conveniente citar los siguientes hechos, observados por Schlœsing. Se pueden destruir los efectos de los cementos arcillosos y húmicos con un lavado con ácido nítrico muy diluído hasta eliminación de las sales cálcicas que determinan la coagulación de la arcilla coloide. Los humatos entonces se descomponen y el ácido húmico, puesto en libertad, se disuelve fácilmente en un líquido algo amoniacal. Una solución nítrica, cuya riqueza es inferior á $1/1000$, no quita más que indicios de hierro y no toma más que la parte del ácido fosfórico que está en combinación con la cal y la magnesia. Después de este tratamiento, los diversos elementos del suelo se hallan libres y pueden ser clasificados por levigación en cierto número de grupos de tamaño decreciente.

Se tomarán, por ejemplo, 50 gramos de tierra, pasada por un tamiz de 1 milímetro, que se someterán á las operaciones descritas antes y después se desleirán en dos litros de agua destilada. Se decanta al cabo de 18 segundos, después de haber agitado el líquido; se decanta nuevamente al cabo de

un minuto. Se renuevan así las operaciones de decantación al cabo de cinco minutos, una hora, cinco horas, veinte horas. Al cabo de muchos meses, no queda más que arcilla coloide en suspensión que se coagula con un poco de ácido nítrico. Los elementos así recogidos, de tamaño decreciente, se tratan con ácido clorhídrico hirviente; se determina cuantitativamente en el producto resultante el ácido fosfórico y el óxido férrico. Schlœsing ha encontrado que existía una progresión rápida en las proporciones de estas dos substancias á medida que disminuían las dimensiones de los elementos. El hecho parece general, porque ha sido observado por el citado autor en multitud de tierras. De esto se deduce la siguiente conclusión: el ácido fosfórico, y el óxido de hierro en particular, forman un revestimiento alrededor de los elementos arenosos. Además, existe una asociación constante de estas dos substancias en relaciones comprendidas entre límites bastante próximos, relaciones que varían de una tierra á otra, pero que son sensiblemente las mismas en una misma tierra. La cantidad de materia carbonada que envuelve á los elementos arenosos de diversos tamaños varía en el mismo sentido que las cantidades de ácido fosfórico y de óxido férrico, según había demostrado ya Masure, si bien empleando un método mucho menos exacto. Esta adherencia especial de substancias muy poco solubles parece resultar de una atracción que los elementos del suelo ejercen sobre las materias que se depositan en su superficie.

Adsorción.—Al lado de este fenómeno de absorción que acabamos de estudiar, y en el cual hemos observado la penetración de ciertos electrolitos en la masa del coloide, ocurre otro fenómeno, el de la *adsorción* (1). Se manifiesta en que

(1) No debe confundirse la *adsorción* con la *absorción*, aun cuando las palabras se parezcan. Una esponja absorbe el agua, y exprimiéndola, el agua se escurre. En cambio, cuando se inmerge una tira de papel de filtro en una disolución, ésta asciende por capilaridad entre las fibras, y á menudo la materia disuelta no sigue exactamente el mismo movimiento que el disolvente, ya que á veces se ve en la parte superior de la columna de papel mojado una zona más ó menos ancha sin colorear, prueba de que la materia colorante ha sido retenida. En el poder absorbente de las tierras respecto de diversas substancias, es muy probable que los fenómenos de adsorción desempeñen un papel muy importante.—C. B.

muchas substancias sólidas, puestas en contacto con soluciones salinas, disminuyen su concentración porque retienen cierta cantidad de la materia disuelta. La arcilla, el calcáreo, el cuarzo, los coloides en estado de *gel* adsorben ciertas sales. La adsorción es una especie de condensación mecánica de la sal en la superficie del sólido. Las curiosas observaciones de Schlœsing, antes citadas, deben ser atribuídas á esta condensación particular. El fenómeno de la adsorción es muy general: se observa en química en muchas circunstancias. Cuando, por ejemplo, se precipita sulfato bárico en presencia de un exceso de una sal de potasio, de cobre, de hierro, etc., sabido es con qué dificultad son eliminadas estas últimas sales aun con un prolongado lavado del sulfato bárico con agua destilada. Existen casos en que esta eliminación nunca es completa.

Del mismo modo que cuando se trata de la absorción, definida como se ha hecho, no se puede invocar, generalmente, la existencia de una acción química propiamente dicha en el fenómeno de la adsorción.

Este modo de ver, sin embargo, no debe adoptarse de un modo absoluto: existen casos en que probablemente interviene la acción química; volveremos á tratar este tema á propósito del poder absorbente de los suelos respecto de las materias fertilizantes.

La adsorción es un fenómeno *electivo*. Un coloide, por ejemplo la arcilla, es capaz de absorber enérgicamente las materias colorantes, así como ciertos iones: NH^4, PO^4; en cambio no actúa sobre los iones Cl, NO^3, SO^4.

Se ha tratado de determinar el valor de la adsorción de algunas substancias poniendo en suspensión en un litro de agua que contiene 0.3 por 100 de verde malaquita, 50 gramos de diversas arcillas ó caolines. Cuando las materias se han posado, se determina mediante el colorímetro la cantidad del colorante absorbido comparando el líquido que hay sobre el sedimento con el de la solución tipo de verde malaquita que se ha empleado (Ashley). Un procedimiento análogo ha sido empleado por algunos experimentadores para *determinar* la cantidad de substancias coloides contenidas en un suelo determinado, suponiendo que la arcilla constituye el coloide más abundante. También se han usado, con este objeto, ciertas substancias salinas, como el fosfato potásico en solución diluída y valorada, cuyos dos

elementos, ácido y base, se fijan en coloides diferentes (König, Hasenbäumer y Hassler).

Ciertos autores creen que son precisamente, como hacíamos presentir antes, los electrolitos adsorbidos por los coloides los que representan las substancias minerales de que se apoderan de preferencia los vegetales. También se ha propuesto alguna vez, para apreciar la cantidad de sales nutritivas adsorbidas por los coloides, someter un peso determinado de tierra, mojada en 10 á 15 veces su peso de agua, á la acción de una temperatura de 120° en una autoclave. Así se destruye el estado coloide, y las sales, adsorbidas, con más ó menos energía, entran en disolución.

Algunas propiedades de los coloides del suelo.—El poder que tienen los diversos electrolitos de producir la coagulación de los coloides varía con la concentración de los electrolitos y con la atomicidad del metal que entra en su composición. Las disoluciones normales del suelo son, como diremos á continuación, soluciones muy diluídas; también la coagulación de los coloides solamente debe efectuarse en las circunstancias en que, temporalmente, aumenta la concentración de estas soluciones. Es de prever, según esto, que el suelo contiene habitualmente un gran número de materias en seudosolución. Estas últimas no pueden mantenerse en esta forma más que gracias á una gran proporción de agua: se comprende, pues, con qué energía deben retener este líquido la mayor parte de los suelos.

Las substancias capaces de hallarse en el suelo en estado coloide son: la *sílice*, de la cual hemos expuesto antes algunas propiedades especialmente interesantes; la *arcilla*, más ó menos impura, y siempre mezclada con sus componentes de origen, como potasa, óxido férrico, etc.; el *hidrato férrico* y el *hidrato de aluminio*, que se encuentran sobre todo en las tierras tropicales, los *silicatos zeolíticos* y, por último, el *humus*. Estudiaremos ulteriormente este humus desde el punto de vista químico, y trataremos de definir la naturaleza de las combinaciones que contrae con las materias salinas.

Es necesario hacer observar que, de una manera general, el paso del estado cristalino al estado coloide es gradual, y que se puede considerar á un coloide como un estado de condensación, de elevado peso molecular, del cristaloide que le

corresponde. Según Sjollema, cada coloide que existe en el suelo parece poseer, respecto de ciertos colorantes artificiales (violeta de metilo, amarillo de naftol, etc.), una afinidad particular.

Existe una causa en virtud de la cual los coloides minerales pueden seguir mucho tiempo en forma de *soles,* aun en presencia de las soluciones salinas de la tierra de labor. En efecto, las seudosoluciones de ciertos coloides orgánicos poseen la facultad, cuando están en contacto con hidrosoles minerales, de impedir la precipitación de estas últimas por los electrolitos. Zsigmondy designa á este fenómeno con el nombre de *acción preservatriz.* Los diferentes coloides orgánicos tienen, en este concepto, una intensidad muy variable. Algunos coloides minerales ejercen también á veces el papel de preservadores. Se comprende fácilmente que, según lo que se acaba de decir, la presencia del coloide húmico favorezca, en la tierra de labor, la difusión de los hidrosoles minerales de un modo tanto más eficaz cuanto más abunde este coloide (Gedroiz).

Precipitación recíproca de los coloides. — Ciertos coloides pueden precipitarse recíprocamente. Sabido es que, cuando se hace pasar una corriente eléctrica por un líquido que contiene una suspensión coloide (metales, sulfuros, ácidos, hidratos), un coloide se dirige al catodo, y se dice entonces que es *positivo;* otro coloide se dirige al anodo, y es calificado de *negativo.* Biltz ha observado que los hidrosoles de electricidad contraria tienden, en ausencia de todo electrolito, á precipitarse en forma gelatinosa cuando se mezclan entre sí. Los hidrosoles del mismo sentido no actúan unos con otros. Para que la precipitación sea completa, es necesario que las cantidades respectivas de los dos coloides estén en cierta relación llamada de *equivalencia.* Apartándose de esta proporción en un sentido ú otro, no hay precipitación: se ve aquí cierta analogía con la formación de sales insolubles por doble descomposición. En virtud de esta precipitación de los coloides de sentido contrario, es posible explicar un fenómeno sobre el cual hemos llamado antes la atención (pág. 109): el

coloide húmico y el coloide arcilloso destruyen mutuamente sus recíprocas acciones (Fickendey).

De esta discusión sobre la presencia de los coloides en el suelo, podemos deducir la extremada importancia de estas substancias respecto de las propiedades físicas de la tierra de labor. Además, los coloides fijan los elementos de nutrición que contienen las disoluciones naturales ó las que se originan por la influencia de la adición de abonos.

Conociendo ahora la constitución física de la tierra de labor, la manera como se comportan unos con otros sus cuatro elementos fundamentales, sus relaciones recíprocas, su estructura íntima, sus relaciones con el agua y el aire, vamos á ocuparnos en el estudio de las propiedades físicas del suelo.

CAPÍTULO V

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS

Nociones generales y definición de las propiedades físicas de los suelos.—Peso específico de la tierra de labor.—Imbibicion de las tierras por el agua; medida de la capacidad de imbibición.—Higroscopicidad.—Aptitud de las tierras para la desecación.—Permeabilidad de la tierra respecto de los gases de la atmósfera. —Relaciones entre el calor solar y el suelo.—Temperatura del suelo.—Calor específico de los suelos y de sus componentes.—Conductibilidad del suelo para el calor.—Calentamiento del suelo y de sus componentes en contacto con el agua.—Trabajo de las tierras.—Barbecho.

Nociones generales y definición de las propiedades físicas de los suelos.—Hemos descrito en las páginas precedentes la constitución física de los diversos elementos de la tierra de labor. Podemos deducir la consecuencia de que los suelos, tomados en conjunto, presentan diferencias que están en relación con el predominio de tal ó cual elemento. Así, pues, esta masa que constituye la tierra vegetal goza de ciertas propiedades particulares que resultan de las mismas condiciones de su formación y de la manera como se comporta respecto de los agentes exteriores. Estas propiedades particulares reciben la denominación de *propiedades físicas*. Las estudiaremos en el orden siguiente: *peso específico, imbibición de las tierras por el agua, higroscopicidad, aptitud para la desecación, permeabilidad para el agua y los gases, relaciones con el calor solar*. No haremos más que mencionar algunas otras propiedades menos importantes. Este estudio de las propiedades físicas nos es facilitado por los datos que hemos adquirido anteriormente; algunas de ellas pueden ser

consideradas como una serie de *aplicaciones prácticas* de las leyes que rigen la circulación del agua y de los gases en el suelo.

Schübler fué el primero en definir de un modo preciso qué debe entenderse con esta expresión de *propiedades físicas* (1830); pero este autor las estudió mediante procedimientos á menudo imperfectos y las consecuencias que dedujo de sus experimentos han sido reconocidas alguna vez como inexactas. Numerosos experimentadores, después de Schübler, han dedicado sus esfuerzos al examen de estas propiedades. Recordaremos principalmente, por haber contribuído mucho al estudio de la física de los suelos, los nombres de Wollny, Haberlandt, A. Meyer, Ramann, Hilgard, Hall y, más recientemente, E. A. Mitscherlich, etc. Desde hace muchos años, toda una falange de agrónomos americanos considera como su misión profundizar los problemas relativos á las propiedades, á la constitución física y al análisis mecánico de los suelos. Pero, por encima de los nombres que acabamos de citar, justo es colocar el de Schlœsing. Debemos, en efecto, á este sabio agrónomo las primeras nociones verdaderamente exactas sobre las relaciones recíprocas de la tierra con el agua, nociones de las cuales citaremos buena parte. Tienen el mérito de haber sido presentadas por su autor con una gran sencillez unida á una gran precisión; su interés teórico y práctico es de primer orden.

Las propiedades físicas de los suelos deben ser estudiadas primero en sí mismas, esto es, independientemente de las *circunstancias del medio* en que se encuentran las tierras: así es como las estudiaremos aquí. Pero, veremos más adelante que estas propiedades sufren en sus atributos modificaciones bastante profundas que provienen de que el medio en que se encuentra una tierra reacciona sobre ella de un modo continuo. Así es que, el espesor de la capa de la tierra de labor, el subsuelo sobre que descansa esta capa, la cantidad de agua de lluvia que almacena, el clima en que se halla, su situación respecto de los cuatro puntos cardinales, son otros tantos factores capaces de modificar la naturaleza de las propiedades físicas de los suelos.

I

PESO ESPECÍFICO DE LA TIERRA DE LABOR

Es preciso distinguir dos cosas en esta cuestión del peso específico de la tierra de labor respecto del agua: el peso específico *real* y el peso específico *aparente*. El primero se obtiene mediante mediciones físicas rigurosas, como cuando se trata de una determinación análoga en un cuerpo bien definido (procedimiento del frasco, por ejemplo). Se encuentran entonces, para algunos elementos de rocas muy comunes y para diversos tipos de tierras, las siguientes cifras:

Feldespatos. . .	2,5 á 2,8	Arcilla en bruto .	2,44 á 2,59
Micas	2,8 á 3,2	Humus y turba. .	1,23 á 1,51
Cuarzo	2,5 á 2,8	Tierra arenosa rica en humus. .	2,45
Espato de Islandia.	2,6 á 2,8	Tierra arcillosa .	2,62
Dolomía. . . .	2,8 á 3,0	Tierra de labor de buena calidad (media) . . .	2,60
Yeso.	2,2 á 2,4		
Arena cuarzosa .	2,64 á 2,74		
Arena calcárea. .	2,47 á 2,81		
Caolín	2,36 á 2,50		

Entre los elementos normales del suelo, la arena cuarzosa es el que tiene el peso específico más elevado; éste disminuye cuando, en las condiciones ordinarias, esta arena está mezclada con proporciones variables de arcilla y humus. Un suelo puramente humífero tendrá un pequeño peso específico. Pero esta constante física, tomada así en sentido absoluto, no tiene más que un valor muy secundario. Sólo permite conocer, como hemos indicado antes, el volumen de aire que contiene un volumen determinado de tierra de labor (pág. 119). Generalmente se admite la cifra de 2,65 como representante del peso específico medio de las tierras de labor.

El único dato interesante *desde el punto de vista práctico* es el *peso específico aparente*, ó dicho en otros términos, el peso de un cierto volumen de tierra tomado en las condiciones habituales, conteniendo en sus intersticios una cantidad variable de agua y de gas de la atmósfera. Este peso específico aparente es muy variable. Se admite que el peso de un metro cúbico de tierra de labor, definido como se ha dicho, es de

unos 1200 kilogramos. Pero, el grado de humedad de la tierra, la compresión más ó menos enérgica á que se somete, como también el cultivo, pueden afectar de una manera muy notable la cifra que acabamos de admitir.

Si se trata de una tierra que contenga muchos guijarros voluminosos, el peso específico aparente subirá en razón del tamaño de estos guijarros. Inversamente, baja mucho si la tierra es rica en elementos orgánicos (humus).

Hemos visto (pág. 119) cómo se puede evaluar con bastante exactitud el peso de un decímetro cúbico de tierra tomada del suelo y en las condiciones variables que se pueden imaginar. El peso específico aparente aumenta, en general, con la profundidad á que se toma la muestra.

II

IMBIBICIÓN DE LAS TIERRAS POR EL AGUA

Volvamos aquí, en cierto modo *desde el punto de vista práctico,* á la cuestión de la relación del suelo con el agua que hemos considerado antes (pág. 119) en concepto teórico.

1.º **Penetración del agua de arriba abajo.** – La penetración del agua de lluvia ó del agua de riego no se efectúa de la misma manera en los diversos suelos. Sabemos que la rapidez de esta penetración, así como la cantidad de agua retenida por la tierra, varían con diversos factores de los cuales el más importante es el grado de finura de los canales capilares y, por consiguiente, el tamaño de los granos que lo determina. Pero, por homogénea que sea una tierra de labor, nunca tiene, como veremos mejor algo más adelante, una estructura tan uniforme que el tamaño de sus granos y el diámetro de sus canales capilares deban considerarse idénticos. Así es que sólo de un modo bastante grosero se puede formar concepto de la marcha del agua en el suelo; cada suelo tiene respecto de este punto una suerte de coeficiente propio. Examinemos primero los componentes de la tierra solos y hagamos los siguientes experimentos:

En una serie de tubos algo anchos, de 2 á 3 centímetros de diámetro, cerrados en su parte inferior con un trozo de tela fuertemente sujeto á sus bordes, pongamos 100 gramos de arena fina seca pasada por un tamiz de mallas de 1 milímetro, 100 gramos de creta pulverizada seca, 100 gramos de caolín y 100 gramos de humus (1). En cada uno de estos cuatro tubos, suspendidos encima de vasos de vidrio que permitan recoger el líquido que escurrirá, vertamos 100 gramos de agua. Observaremos que el agua desaparece muy rápidamente en el humus, menos aprisa en la arena, con más lentitud en la creta y muy lentamente en la arcilla. Examinemos ahora cuáles son las cantidades de agua que, después de haber atravesado con una velocidad muy variable los diversos elementos, han escurrido en los vasos subyacentes. El vaso que corresponde á la arena es el que contiene mayor cantidad de líquido, y contendrá tanto más cuanto mayores sean los granos de la arena; el que corresponde á la creta contiene menos, pero contiene más que el vaso correspondiente á la arcilla. En cuanto al tubo que contiene el humus, no deja escurrir agua. Se deduce de este ensayo, que los elementos constituyentes del suelo, desde el punto de vista de la penetración del agua de arriba abajo, pueden ser definidos así: el humus absorbe muy rápidamente el agua y conserva una gran cantitad; con la arena, la absorción es aún bastante rápida, pero este elemento retiene poca agua; la creta se imbibe lentamente y retiene mucho líquido; en cuanto á la arcilla, se deja penetrar todavía más lentamente por el agua, de la cual conserva grandes cantidades. El calcáreo, y sobre todo la arcilla, presentan canales capilares mucho más finos que los de la arena empleada; el roce del agua es, pues, considerable: de donde la lentitud con que penetra este líquido. Si la cantidad de agua que escurre, al cabo de un tiempo á veces muy largo, es pequeña, se debe esto á la exigüidad de los canales, que retienen tanto más líquido cuanto más finos son y, por consiguiente, más numerosos.

Es necesario hacer aquí una observación que nos sugieren los hechos que hemos estudiado antes. Cuando se vierte agua sobre una arena muy seca, esta agua no penetra inmediatamente; pero, cuando la arena ha sido llevada primero á cierto grado de humedad, se deja atravesar mucho más rápidamente por el líquido.

En lo que concierne al humus, es indispensable hacer notar que, cuando este elemento es seco, parece que el agua no le moja. El líquido resbala en cierto modo sobre su superficie. Se debe esto á que las partículas húmicas están recubiertas, generalmente en pequeña

(1) Se obtiene éste fácilmente tomando algunos centenares de gramos de mantillo de jardinero y poniéndolos en un barreño: se añade agua y malaxa la masa de manera que se separen los elementos minerales pesados que contiene. La mayor parte de la materia mineral sobrenada; se recoge y, después de haberla dividido bien, se deja desecar al aire, hasta que no se pegue á los dedos cuando se coge un puñado. Se introduce en el tubo procurando que quede en él ligeramente apretada.

cantidad, de materias resinosas que las protegen contra la acción del agua. Además, la tensión superficial del agua se opone á su paso por este medio muy seco: es preciso, á veces, esperar mucho tiempo antes de que el agua penetre en la masa de humus. Por esto, cuando se quiere hacer el experimento antes descrito, es necesario malaxar cuidadosamente primero el humus seco con cierta cantidad de agua, que deberá ser tenida en cuenta en un experimento cuantitativo.

El anterior experimento, realizado con los cuatro componentes de la tierra de labor, no puede aplicarse con exactitud á la práctica, porque los suelos exclusivamente calcáreos, arenosos, arcillosos ó humíferos son muy raros.

Sin embargo, podemos enunciar algunas proposiciones generales, como las que siguen. Un suelo en que domine la arcilla es poco permeable para el agua, pero, en cambio, retiene bien este líquido. Un suelo pobre, formado sobre todo por elementos arenosos, absorbe fácilmente el agua, pero no conserva de ella más que pequeña cantidad. Finalmente, en un suelo muy seco, la penetración del agua es tanto más difícil cuanto más abunda el humus:

2.° **Penetración del agua de abajo arriba.** — Examinemos ahora el movimiento inverso.

Para ello tomemos tubos análogos á los que acaban de servirnos para la demostración de la facultad de imbibición, y llenémosles de los mismos elementos que antes, prescindiendo ciertamente del tubo con humus, que no daría resultado alguno en este caso. Introduzcamos sólo una pequeña modificación consistente en mezclar, antes de ponerlas en los respectivos tubos, la arena, la creta y la arcilla con una trigésima parte de su peso aproximadamente de sulfato de cobre anhidro (esta sal es blanca). En seguida hagamos que entre la parte inferior de estos tres tubos en un cristalizador que contendrá una capa delgada de agua. No tardaremos en ver que el líquido sube rápidamente en la arena y lo reconoceremos por el color azul que toma la columna de arena, porque el sulfato de cobre anhidro se vuelve azul en contacto con el agua. Teniendo en cuenta las nociones adquiridas en el capítulo precedente, hemos de pensar que la ascensión del agua será tanto más rápida en la arena cuanto más grandes sean los granos de ésta; tanto más lenta, pero tanto más elevada, cuanto más finos sean los granos. La ascensión del agua en la creta, reconocida por el azulado de su masa, es mucho más lenta que en la arena; sin embargo, es más rápida que la ascensión en la arcilla. Esto es debido á que los canales capilares de la creta pulverizada, y

sobre todo los de la arcilla, son infinitamente más estrechos que los de la arena que pasa por el tamiz de 1 milímetro. Pero, al cabo de un tiempo bastante largo, la altura á que llegará el líquido será mucho más considerable que en la arena. Sin embargo, no se repetirá demasiado que el roce del agua con las paredes de tubos muy estrechos puede ser tal que el líquido no pueda elevarse por encima de cierto nivel. Se deduce de esto que, desde el punto de vista práctico, una tierra arenosa que reposa sobre un subsuelo impermeable en la superficie del cual se extiende una capa de agua, dejará pasar bastante fácilmente el líquido á su través; por el contrario, una capa de arcilla debajo de la cual se hayan infiltrado las aguas formará un obstáculo casi infranqueable á la ascención del agua á una tierra situada encima de esta arcilla.

Medida de la capacidad de imbibición.—El lado teórico de esta cuestión ha sido expuesto ya en la pág. 124 del capítulo anterior, donde hemos estudiado las capacidades máxima y mínima de la tierra respecto del agua. Examinemos ahora cómo conviene operar para *medir* la cantidad de agua de que puede cargarse una tierra normalmente.

Entre una tierra exclusivamente arenosa que retendría, en general, poca agua, y una tierra exclusivamente arcillosa que fijaría mucha, hay muchos grados intermedios. Es necesario conocer, para satisfacer las exigencias del cultivo, cuál es aproximadamente la proporción de agua que puede retener una tierra cuando ha sido regada de una ú otra manera, dejando escurrir el exceso del líquido que la impregnaba.

La medida del poder absorbente de un suelo respecto del agua fué efectuada por primera vez por Schübler de la siguiente manera: Se pone en un embudo provisto de un filtro de papel mojado, escurrido y pesado luego, un peso conocido de tierra; se vierte encima agua y se espera que el líquido excedente haya escurrido completamente por el pico del embudo. En seguida se pesa el filtro y la tierra húmeda. El peso de esta tierra húmeda, comparado con el de la tierra seca inicial, indica la proporción de agua que la tierra ha conservado. Empleado en muestras muy variadas, este método da cifras demasiado altas: 100 gramos de tierra de labor ordinaria retendrían así de 60 á 80 gramos de agua. Este experimento suministra solamente la *capacidad máxima* de una tierra respecto del agua.

He aquí cómo demostró Schlœsing la incorrección de esta manera de operar. Se toma un tubo de vidrio de 3 á 4 centímetros de diámetro y de 40 centímetros de longitud que se tapa por uno de sus extremos mediante ún trozo de tela fijado sólidamente en sus bordes.

Se inmerge este tubo en una gran campana que contenga agua teñida con fucsina ó con violeta de París. Cuando el nivel del agua es igual en el exterior y en el interior, se vierte suavemente en el tubo arena fina hasta los dos tercios de su altura; de esto puede formarse cargo determinando antes la capacidad del tubo. Previamente se habrá pasado la arena á través de un tamiz, cuyas mallas sean, por ejemplo, de 1 milímetro. Operando así la arena se reparte en el líquido en capas sensiblemente homogéneas; lo que no ocurriría si primero se llenase el tubo de arena y se inmergiese luego en el líquido coloreado. Después se saca el tubo de la campana y se deja escurrir verticalmente. Desde que principia á escurrir, la parte superior de la arena se descolora sensiblemente y, cuando ha acabado de escurrir, el tubo queda dividido claramente en dos regiones: la superior, en la cual la arena es poco coloreada, y la inferior, en la cual la arena tiene un color casi tan subido como en el momento en que se sacó el tubo de la campana.

Sabemos, en efecto, que entre los elementos de la arena existen *verdaderos canales capilares*. Estos canales, en el momento en que el tubo sale del líquido coloreado, están completamente llenos de este líquido; por esto el color de la arena es en este momento uniforme. Pero, á medida que el agua escurre, los canales se vacían poco á poco en la parte superior; en su parte inferior, por el contrario, siguen llenos, y la altura de sus columnas líquidas es *igual á la de las columnas de agua cuyo peso puede ser equilibrado por la capilaridad*. Los granos de arena de la parte superior, cuyos canales son vacíos, retienen simplemente por la atracción de su superficie una delgada película líquida: de donde su débil coloración en el caso presente.

La exactitud de esta explicación se deduce del hecho siguiente. Si se toman muestras de arena bien homogéneas, pero cada vez más finas, y se repite con ellas el experimento anterior, se debe esperar encontrar, después de dejar escurrir los tubos, regiones inferiores coloreadas de una altura tanto mayor cuanto más fina sea la arena empleada y, por consiguiente, cuanto más estrechos sean los capilares. Y esto es, efectivamente, lo que ocurre. Así, pues, dada la manera de proceder de Schübler, la tierra, como observa con razón Schlœsing, no pierde su agua cuando está en el filtro; sus canales capilares siguen llenos de líquido en toda su extensión, del mismo modo que en la región inferior de los tubos en los últimos ensayos. Se obtienen pues, forzosamente, operando como Schübler, cifras demasiado elevadas; porque, en las condiciones naturales, la tierra se deseca siempre después de la lluvia ó del riego, á lo menos en sus capas superiores. Que ciertos suelos muy compactos, muy arcillosos, ceden su agua con gran lentitud, es cosa evidente; pero no debe creerse que entonces se está en presencia de una proporción de humedad normal. La cifra que se obtendría en estas condiciones correspondería á una proporción de agua demasiado alta. Si se toma.

como proporción *normal* de humedad, la cantidad de agua retenida por los elementos arenosos de la parte superior de los tubos cuando cesa de gotear el agua, se halla que esta proporción varía con *la finura de los elementos* y que es tanto mayor cuanto más finos son los granos. Schlœsing ha comprobado el hecho experimentalmente preparando mezclas con pesos conocidos de diversas arenas cuarzosas de dimensiones desiguales, á las cuales añadía agua. Una vez conseguida la homogeneidad de estas mezclas, se dejan abandonadas á sí mismas durante veinticuatro horas. Al cabo de este tiempo se determina la proporción de humedad total, luego, después de un tamizado, la proporción de humedad en cada una de las partes que formaban la mezcla. Se encuentra entonces que la arena más fina contiene, á igualdad de peso, mucha más agua que la arena más gruesa: y, si la mezcla artificial está formada por pesos iguales de dos arenas de dimensiones muy desiguales, se observa que la media aritmética de la proporción de agua de cada una de estas dos arenas es sensiblemente igual á la proporción de agua de la mezcla inicial.

Se deduce, pues, de lo que precede, que una tierra bien escurrida contendrá una proporción de humedad tanto mayor, para un peso dado, cuanto más finos sean los elementos de esta tierra.

Imbibición de la tierra vegetal. — Veamos cómo son las cosas cuando se efectúa el anterior experimento, no ya con una arena de un tamaño determinado, sino con tierra vegetal. En este caso, no es posible emplear agua coloreada: la diferencia de intensidades de color no podría percibirse. Pongamos una tierra medianamente arcillosa desmenuzada en un tubo de 40 centímetros de altura inmergido en agua ordinaria y, después de dejarlo escurrir, estudiemos la repartición del agua por *pesada de muestras tomadas á diferentes alturas*. Veremos entonces que el tubo puede ser dividido en tres regiones. Una región superior en la cual la cantidad de agua es constante y débil, una región media en la cual la cantidad de agua es variable y aumenta de arriba abajo, por último una región inferior en la cual la cantidad de agua es constante, pero mayor que la de la región superior. En efecto, los canales capilares que existen en la tierra, dispuesta como acabamos de hacer, funcionan como los de la arena; la existencia de dos regiones, superior é inferior, se explica del mismo modo que respecto de la arena. Pero, como la tierra no ha sido tamizada, es evidente que los canales capilares que surcan su masa deben ser desiguales y

quedan llenos de líquido en alturas muy variables. A esta desigualdad de diámetro de los tubos capilares corresponde precisamente la región media del tubo en la cual la cantidad de agua retenida va aumentando de arriba abajo.

Cuando se trataba de la arena sola, hemos admitido que el agua que mojaba esta substancia, después de escurrir, se encontraba en cada grano, suponiéndole esférico, en forma de una delgada película cuyo espesor era probablemente independiente del diámetro de la esfera. En el caso de la tierra de labor, los elementos minerales tienen formas extremadamente variables, y si existe una película de aire que se adhiere, después del escurrimiento, á la superficie de cada uno de ellos, se puede además concebir que los elementos, provistos frecuentemente de cavidades, retienen en estos *poros* de muy pequeñas dimensiones una cierta cantidad de líquido que no fluye aun después de dejar escurrir mucho tiempo la tierra. En realidad, los poros constituyen canales capilares muy cortos en los cuales el agua ha expulsado al aire; estos canales no tienen que sostener, pues, más que columnas líquidas muy pequeñas.

Si se comparan las cifras dadas por Schübler, obtenidas por medio del procedimiento del filtro, con las que Schlœsing ha determinado por el método de los tubos después de dejarlos escurrir, se tienen los resultados siguientes:

	Cantidades de agua retenidas por 100 partes de arena ó de tierra	
	Según el método de Schübler	Según el método de Schlœsing
Arena fina.	20	7,3
— gruesa. . . .	16	3

	Tierra desleída en agua y vertida en el filtro	Tierra desmenuzada puesta en el filtro y regada con agua	
1.° Tierra arcillosa . .	47,7	49,0	35,0
2.° » arcillocalcárea	43,5	51,7	30,0
3.° » arcilloarenosa	45,7	54,7	37,5
4.° » de bosque formada por arena muy fina	57,7	61,8	42,0
5.° Calcáreo arenoso .	40	41	32

El método del escurrimiento es, pues, el solo que suministra la *proporción normal* de agua que contiene un suelo determinado; esta proporción varía de 30 á 40 por 100 del peso de la tierra seca.

Schlœsing añade que, si el escurrimiento, practicado como hemos dicho, se aproxima más á las condiciones naturales, difiere sin embargo en que la tierra empleada ha sido necesariamente desmoronada; y la división en partículas *ejerce influencia en la cantidad de agua retenida por el suelo.*

Como conclusión, diremos que la determinación de la cantidad de agua contenida en una tierra determinada debe hacerse mediante un experimento directo. De una tierra lavada por las aguas de lluvia y bien escurrida, se tomarán muestras á profundidades determinadas y se desecarán en la estufa á una misma temperatura; las cifras así obtenidas representarán la verdadera proporción de humedad respecto de cada capa examinada. Las tierras que más fácilmente retienen el agua, y cuyo escurrimiento es muy difícil, son las tierras de elementos arenosos muy finos, cuya división en partículas ya no está asegurada por una cantidad suficiente de arcilla ó de humus. Sus elementos, muy poco coherentes en este caso, se sueldan, y quedan entre ellos canales capilares de tal finura, que no se vacían más que con una extremada lentitud cuando esta tierra está mojada: testimonio de ello, la tierra n.º 4 de la tabla precedente.

Kopecky determina la capacidad *absoluta* del suelo para el agua por medio de un procedimiento que consiste en cortar un prisma de tierra de volumen conocido, impregnarlo completamente de agua, como puede estarlo la capa superior de una tierra después de una lluvia prolongada, y desecar este prisma aplicándolo por su base á una capa de tierra de la misma naturaleza, desecada al aire y puesta en una caja. Cuando la pérdida de peso ha llegado á ser constante, se pesa el prisma, y la cantidad de agua que contiene en este momento representa la *capacidad absoluta del suelo para el agua.* La determinación del peso aparente y la del peso específico permiten calcular el espacio total existente entre las partículas térreas, esto es, la *porosidad de la tierra.* Restando del volumen que expresa la porosidad el volumen que expresa la capacidad para el agua se

obtiene en volumen el espacio que dejan libre tanto el líquido como los elementos térreos: es la *capacidad del suelo para el aire* (según de Ville Chabrolle; *An. Inst. agron.* (2), VII, 325 (1908).

III

HIGROSCOPICIDAD

Se llama *higroscopicidad* la propiedad que tiene la tierra vegetal de condensar la humedad de la atmósfera. La tensión del vapor de agua contenido en ésta es esencialmente variable. La tierra atrae el vapor atmosférico y lo retiene, de manera que el agua que recubre las partículas térreas posee una tensión de vapor diferente de la que correspondería al caso en que la atracción del agua por la tierra fuese nula. Esta higroscopicidad se encuentra, por otra parte, en una multitud de substancias pulverulentas. Depende esencialmente de la atracción que ejercen las superficies sólidas sobre el vapor de agua; por consiguiente, dos tierras ó dos arenas de la misma naturaleza cuyos granos, á igualdad de peso, tengan dimensiones muy diferentes, fijarán cantidades de agua higroscópica que variarán con la finura de los elementos y serán directamente proporcionales á la superficie de éstos. En este concepto, la arcilla y el humus retienen mucha agua higroscópica. Según Loughridge, los silicatos zeolíticos, la sílice, los hidratos de hierro y de aluminio son, entre los componentes de la tierra de labor, las substancias más higroscópicas.

La temperatura y el estado higrométrico del aire ambiente desempeñan un papel capital respecto de la cantidad de agua higroscópica de que puede cargarse una tierra. Si la temperatura se eleva, la proporción de agua disminuye. Aumenta cuando crece la tensión del vapor de agua de la atmósfera.

El único procedimiento correcto que permitiría determinar exactamente la higroscopicidad de una tierra consistiría, según Schlœsing, en tomar muestras de esta tierra, con diversas proporciones de

humedad, y hacer circular por ellas, á determinada temperatura, una corriente de aire bastante lenta para llevarse consigo todo el vapor de agua que la tierra podría cederle. Luego se pesaría el agua así desprendida y recogida en un aparato absorbente. Se calcularía la tensión del vapor de agua en el aire salido del aparato y *esta tensión sería la del agua depositada en la superficie de la tierra en las condiciones en que se habría hecho el experimento.*

Pero, desde el punto de vista práctico, sólo pueden ser suficientes las determinaciones hechas por Schübler. 5 gramos de tierra seca, extendidos en capa delgada en una superficie de 360 centímetros cuadrados, son expuestos en una habitación donde se ha esparcido agua de manera que la atmósfera esté saturada. Pesándose cada doce horas las muestras de tierra, se encuentran, expresadas en gramos, las siguientes cifras que indican la cantidad de agua absorbida por 5 gramos de materia á una temperatura de 15-18°:

Al cabo de:	12 horas	24 horas	48 horas	72 horas
Arena silícea. . . .	0	0	0	0
— calcárea . . .	0,01 gr.	0.015 gr.	0,015 gr.	0,015 gr.
Arcilla magra . . .	0,105 »	0,130 »	0,140 »	0,140 »
— grasa. . . .	0,125 »	0,150 »	0,170 »	0,175 »
Tierra de jardín. . .	0,175 »	0,225 »	0,250 »	0,260 »
Humus	0,400 »	0,485 »	0,550 »	0,600 »

(Schübler.)

Resulta de la inspección de estos números que la higroscopicidad de la arena silícea y calcárea es muy débil, que la de la arcilla es algo mayor, y que la higroscopicidad de la tierra parece no adquirir una cifra más elevada que la de sus componentes minerales más que cuando contiene una notable cantidad de humus. El humus posee, en efecto, un poder absorbente bastante considerable respecto del vapor de agua. Schlœsing hace notar, á propósito de esto, que el aire, en los experimentos de Schübler, no estaba saturado de un modo absoluto porque evidentemente debía renovarse en la cámara con más ó menos facilidad: en esto también las condiciones en que se puso Schübler se aproximan á las condiciones naturales.

Si se trata de una atmósfera *saturada*, tal como puede obtenerse haciendo uso de una campana que recubre un vaso lleno de agua, y se ponen en esta campana, por una parte arena bien seca, y por otra parte una muestra de esta misma arena *calcinada*, se encuentran, según Schlœsing, las siguientes cantidades de agua condensada para 100 partes de arena, al cabo del número de días que se indican en el adjunto cuadro (temperatura comprendida entre 15° y 20°):

	Al principio	2 días	4 días	10 días	24 días	70 días
Arena natural . .	0	1,69	1,90	2,33	2,43	2,50
— calcinada. .	0	0,50	0,59	0,70	0,87	0,90

La proporción de agua higroscópica aumenta, pues, constantemente y durante un tiempo muy largo. Schlœsing explica este resultado de la manera siguiente: Cuando la atmósfera está saturada, para una baja, aunque pequeña, de temperatura, se condensa cierta cantidad de vapor de agua y por consiguiente se deposita en la arena. Si la temperatura aumenta, hay vaporización del agua líquida. Pero, *por débil que sea la atracción ejercida sobre ella por la arena, se vaporiza en su superficie, por una elevación de temperatura determinada, menos que la que se condensa* por una disminución igual. Por esto la arena absorbe agua de un modo continuo. Esta absorción cesa en el momento en que la capa de agua que rodea los granos deja de estar sensiblemente retenida en su superficie.

Así, cuando una tierra previamente desecada es puesta en contacto con una atmósfera absolutamente saturada de agua, el equilibrio final se establece con una extremada lentitud. Pero, por efecto de estas condensaciones y de estas vaporizaciones sucesivas que producen las menores variaciones de la temperatura, la tierra, según muchos autores, se cargaría de una cantidad de agua superior al agua de higroscopicidad. Por esto las cifras que se obtendrían por el método precedente serían demasiado elevadas. Mitscherlich emplea, para determinar la higroscopicidad de una tierra, no una disposición que asegure la saturación perfecta de la atmósfera, sino un procedimiento en el cual se emplea agua que contiene en disolución una substancia capaz de disminuir la tensión del vapor (ácido sulfúrico del 10 por 100).

Influencia de la temperatura en la higroscopicidad de la tierra vegetal. — Según Schlœsing, si se designa por f la fuerza elástica del vapor de agua en una tierra (ó en el aire que sale de esta tierra) y por F la fuerza elástica máxima del vapor de agua á la misma temperatura, la experiencia demuestra que la relación $\frac{f}{F}$ se eleva lentamente con la temperatura. Los experimentos fueron hechos en un intervalo comprendido entre 9° y 35° con tierras que contenían respectivamente 0,82, 1,53, 2,14, 2,83, 4,64 de agua para 100 de tierra seca. Como esta relación no es absolutamente constante, Schlœsing ha formulado la siguiente conclusión: para un mismo estado higrométrico de la atmósfera, la tierra toma *aproximadamente* una misma proporción de humedad, independientemente de las variaciones de temperatura comprendidas entre 9° y 35°.

Desecación absoluta de una substancia. — Á propósito de las propiedades higroscópicas de la tierra y de la determinación, en general, de la proporción de agua que contiene una substancia vegetal, la tierra en particular, proporción que se determina generalmente por desecación en la estufa á 110°, no es inútil hacer las siguientes observaciones en las cuales ha insistido Maquenne. Una substancia vegetal mantenida en el aire ordinario de una estufa calentada á 110-120°, hasta peso constante, retiene siempre cierta cantidad de humedad que varía con la temperatura y el estado higrométrico de la atmósfera. Esta agua no se desprende más que *si se anula la tensión de su vapor en el medio ambiente:* por ejemplo, haciendo la operación en el vacío ó en una corriente de aire seco. Esta desecación *absoluta* parece ser completa después de una calefacción de una hora á 120° ó de dos horas á 100° en una corriente de aire seco. La materia así tratada queda inalterada y proporciona una riqueza en agua superior de 1 por 100 aproximadamente á la que los métodos ordinarios habrían suministrado en un tiempo mucho más largo.

La desecación absoluta de la tierra de labor debe efectuarse en una corriente de aire seco y calentando la substancia á 110°-120°. Por lo general, se contenta con una desecación en la estufa á esta temperatura, cuidando de desecar la cápsula que contiene la tierra (10 á 40 gramos según los casos) en una caja de vidrio circular cuya tapadera es esmerilada (caja análoga á los frascos pesafiltros, pero de mayor diámetro), para evitar el contacto con el aire. Este procedimiento, más sencillo que el anterior, generalmente es suficiente; pero, según lo que se acaba de decir, la proporción de agua que da es algo pequeña.

A. Mitscherlich pone la tierra en un recipiente cerrado en presencia de anhídrido fosfórico. Se calienta el conjunto en baño maría á 100° durante cuatro horas.

Añadamos, para terminar, una última observación. Cuando se calienta una substancia cualquiera en una estufa de aire caliente, la temperatura es generalmente mal definida, sobre todo cuando la estufa es algo espaciosa. Para precisar esta temperatura es indispensable emplear pequeños termómetros que no comprendan más que un número limitado de grados (por ejemplo, de 90 á 115°) y poner el depósito de éstos en la inmediata proximidad ó en el interior de la substancia que se deseca para poder apreciar el grado exacto de la temperatura á que llega ésta; se debe regular la calefacción de la estufa teniendo esto en cuenta.

IV

APTITUD DE LAS TIERRAS PARA LA DESECACIÓN

Principalmente á Schlœsing debemos, desde el punto de vista práctico, un estudio muy racional sobre el tema, muy importante, del movimiento del agua en una tierra húmeda. Expongamos primero el procedimiento antiguamente empleado por Schübler. Este autor medía la aptitud de las tierras para la desecación estableciendo la relación entre el peso del agua que pierden por evaporación y el peso máximo del agua de que pueden cargarse. Con este objeto, se extiende sobre un disco metálico, provisto de un pequeño reborde, tierra vegetal impregnada al máximo y dejada escurrir en un filtro, según los procedimientos de imbibición anteriormente descritos. Se hace una primera pesada, luego se pone el disco durante cuatro horas á una temperatura conocida (18°). Se pesa al cabo de este tiempo. Se obtiene así un peso p de agua evaporada. Se lleva en seguida á la estufa y se determina al cabo de algunas horas el peso P de agua total contenida en la tierra. La aptitud para la desecación es representada por la expresión $\frac{p}{P} \times 100$.

Schlœsing hace observar por de pronto que, en tales determinaciones, el número p es poco más ó menos invariable. En efecto, la experiencia enseña que las tierras más diversas, preparadas como hacía Schübler; esto es, impregnadas de agua al máximo (35 por 100 aproximadamente de la tierra seca) y extendidas en capa delgada, pierden, en las mismas condiciones exteriores, cantidades de agua sensiblemente iguales. Estas tierras no principian á presentar entre sí alguna diferencia más que cuando la cantidad de agua que contienen baja á menos de 6 á 7 por 100. Llegada á este término, una tierra muy arcillosa perderá menos agua que una tierra arenosa. Así, ya que p es sensiblemente constante, la aptitud de la tierra para la desecación sería, según

Schübler, inversamente proporcional al peso P de agua que contiene esta tierra impregnada al máximo.

Influencia de la finura de los elementos. — Schlœsing ha puesto en evidencia el lado defectuoso del experimento de Schübler. En efecto, si no se trata más que de una simple evaporación en el caso de una tierra expuesta al aire en capa delgada, no ocurre lo mismo cuando la tierra ocupa cierto espesor. La evaporación no puede efectuarse más que en la superficie que está en libre contacto con la atmósfera, casi siempre no saturada de vapor y renovada sin cesar. El agua que se encuentra en el interior de la masa térrea debe trasladarse á la superficie á fin de vaporizarse en ella y entonces sigue la desecación. Es preciso, pues, en la pérdida de agua de la tierra, tener en cuenta dos fenómenos concomitantes: pérdida del agua en la superficie y el transporte del agua interior hacia ésta. Si se consideran dos tierras que contengan la misma proporción de agua, pero cuyos elementos sean de tamaño desigual, la facilidad con que el agua circulará en estas dos tierras será muy diferente.

Para estudiar el mecanismo de la desecación de las tierras, Schlœsing emplea vasos de porcelana barnizada del mismo diámetro y de la misma profundidad, de una cabida ligeramente superior á 1 litro. Habiendo separado por levigación los elementos de una tierra, llenó un primer vaso de la arena más gruesa, un segundo de arena fina y un tercero de arena muy fina. Se procura que estas tres arenas contengan aproximadamente la misma proporción de humedad (15 por 100), y se ponen en seguida en un local cuya temperatura oscile de 15° á 20°. Los vasos se pesan cada dos días durante cosa de un mes; al fin del experimento se saca de cada vaso la arena por capas horizontales de espesor conocido y se determina en ellas la humedad. Se hace luego una gráfica poniendo como abscisas las proporciones de agua por 100 de arena seca y como ordenadas las alturas que tienen las capas de la arena en cada vaso.

Se encuentra, al cabo de veintisiete días de seguir el experimento, que la primera muestra de arena (arena gruesa) ha perdido mucha más agua que la segunda (arena fina) y ésta mucho más que la tercera (arena muy fina). Así, pues, los elementos arenosos oponen al paso del agua hacia la superficie un obstáculo tanto mayor cuanto más finos son. La repartición del agua en las diferentes capas

horizontales de arena, estudiada por la determinación de la pérdida global de agua durante veintisiete horas, se expresa en las dos curvas adjuntas (fig. 4). La curva n.º 1 (arena gruesa que contenía 15,9 por 100 de agua al principio) muestra que la humedad de la arena ha variado de 5,3 por 100 á 4,25 desde el fondo del vaso hasta una altura próxima á 4 centímetros debajo de la superficie; no hay, pues, más que una diferencia de 1 por 100 entre las proporciones de humedad de regiones relativamente alejadas unas de otras; la curva es casi paralela al eje de las ordenadas, y se deduce de ella que todas las regiones, comprendidas entre el fondo del vaso y una paralela al eje de las abscisas trazada á 4 centímetros debajo de la superficie, se han desecado de una manera casi idéntica; por consiguiente, la circulación del agua se ha efectuado con facilidad en esta arena.

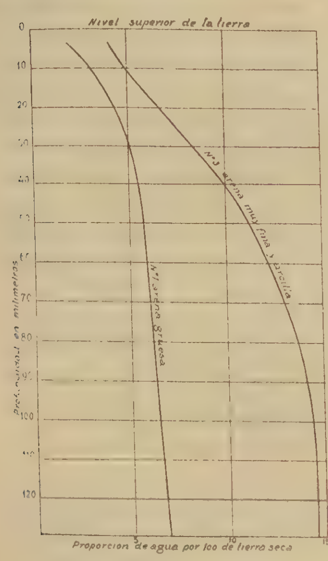


Fig. 4.

El examen de la curva número 3 (arena muy fina con 15,1 por 100 de agua al principio) muestra, por el contrario, que esta curva está mucho más inclinada que la precedente en la región examinada antes. En el fondo del vaso, la tierra apenas se ha desecado; contiene casi la misma proporción de agua que al principio. Por lo tanto, el movimiento del agua se ha efectuado á través de la masa mucho más difícilmente que en la muestra n.º 1 formada por arena gruesa. Se deduce, pues, que la finura de los elementos presenta un obstáculo muy grande á la circulación del agua á través de la tierra.

King ha construído curvas del mismo género, obtenidas estudiando la distribución del agua á diferentes alturas en cilindros llenos de arena y de tierra arcillosa. Estas dos materias eran saturadas primero de agua y luego se dejaban escurrir hasta que dejaba de gotear agua por la parte inferior. La arena contiene una proporción de agua casi constante y muy poco elevada en la mayor parte de su altura; la tierra arcillosa, por el contrario, está empapada de agua de una manera casi uniforme hasta una distancia poco alejada de su superficie. Esta está en relación con los experimentos de imbibición efectuados en los tubos de Schlœsing (pág. 151).

El examen de las dos curvas precedentes sugiere también una observación importante. Cerca de la superficie, la cantidad de humedad disminuye en proporciones muy notables, aunque de una manera variable con el tamaño de los granos. También la desecación experimenta una baja por esta disminución. Se ve entonces aparecer en la superficie de la tierra una *costra* poco permeable que protege á la masa subyacente de los efectos de la evaporación. Esta costra se origina en las siguientes condiciones: Si el agua circula fácilmente en el interior del suelo, la superficie de éste, en contacto directo con la atmósfera, permanece húmeda porque el agua que se evapora es reemplazada constantemente por el agua que sube de las capas inferiores; pero, desde el momento en que este ascenso del agua se hace más penoso, la evaporación predomina, la superficie se deseca y el agua sólo difícilmente la atraviesa. Esta costra protectora impide, pues, que la tierra pierda agua, y su formación es facilitada por ciertas circunstancias exteriores. Si se supone que el aire en contacto con la tierra está á una temperatura elevada y es renovado sin cesar por la acción de un viento continuado, la costra protectora se formará aun cuando la proporción de agua contenida en la tierra es todavía notable. En el caso en que la atmósfera es húmeda y tranquila, la costra no se forma, por más que la tierra sea poco rica en agua. Bueno es observar que una extensión determinada de tierra presenta siempre una superficie mucho mayor que la misma extensión de agua, á causa del estado particular en que se halla la tierra, aun cuando no haya sido trabajada. Una extensión determinada de tierra ofrecerá una superficie tanto mayor cuanto más haya sido dividida, cuanto más la hayan removido los instrumentos de labranza. Si se compara una extensión de tierra húmeda con una extensión igual de agua, se encuentra que la pérdida de agua por evaporación que sufre la tierra húmeda, á igualdad de las demás circunstancias, es mayor que la que experimenta la misma superficie de agua (Haberland). Por lo tanto, cuando, con labores repetidas, se remueve y vuelve muelle la superficie de la tierra, se activa la evaporación del agua que contiene; pero, como lo demuestra el experimento del trozo de azúcar (pág. 127), la capa de tierra así esponjada impide que el agua de las capas profundas llegue á la superficie cuyos canales capilares han sido destruídos por el laboreo.

Influencia del grado de humedad del suelo en su desecación. Si se toman muchas muestras de una misma tierra, se las adiciona de cantidades crecientes de agua y se las pone en vasos de porcelana análogos á los del experimento precedente, se encuentra, según Schlœsing, que los pesos de agua evaporada son tanto mayores, para un mismo intervalo de tiempo, cuanto más húmeda es la tierra. La tierra pierde

cantidades de agua *proporcionales á los tiempos*, hasta que su humedad media baja á 15 por 100. Por debajo de esta cifra la desecación disminuye mucho.

Influencia del agua de imbibición y del agua de higroscopicidad en la vegetación. Hemos visto antes (pág. 162) que una tierra de elementos gruesos pierde más rápidamente el agua de que está embebida que una tierra de elementos finos, porque, en el primer caso, la circulación del líquido es mucho más fácil. Se debería deducir de esto que la tierra de elementos gruesos no podrá proporcionar agua á los vegetales que en ella crecen más que durante un tiempo más corto que cuando se trata de una tierra de elementos finos. Pero Schlœsing hace observar que lo que ocurre es lo contrario: el agua circula fácilmente en la primera tierra, en la segunda circula con dificultad. Así es que la primera tierra, de elementos gruesos, alimentará mejor de agua las plantas. Sachs ha demostrado que, en efecto, una planta de tabaco se marchita en un suelo arcilloso de elementos finos cuando la humedad pasa á ser menos de 8 por 100, mientras que, en una arena de granos gruesos, esta misma planta no se marchita hasta que la proporción de humedad llega á ser menos de 1,50 por 100. La diferencia que aquí se observa es debida únicamente á la dificultad con que el agua circula en la tierra de elementos finos. Además, desde el punto de vista del aprovisionamiento de una tierra en agua, debe notarse que, para un mismo volumen aparente, el peso de la tierra es tanto mayor cuanto más grandes son sus elementos. Los dos vasos cuya observación ha conducido al trazado de las curvas 1 y 3 (pág. 162) contenían respectivamente 1554 gramos y 1109 gramos de arena en un volumen poco más ó menos equivalente. Resulta que, para una misma proporción centesimal de agua, este líquido es más abundante en la arena de elementos gruesos que en la de elementos finos (Schlœsing).

¿Puede servir el agua higroscópica para alimentar los vegetales?—La experiencia enseña que, en el caso de un suelo determinado, una planta se marchita con una proporción de agua generalmente mucho más elevada que la que corresponde al

agua higroscópica (Heinrich). Sin embargo, se ha creído, durante mucho tiempo, que la sola condensación de la humedad en la superficie del suelo bastaba para mantener la vegetación, aun cuando las capas inferiores no dejasen subir este líquido á la superficie. No hay nada de esto. Una planta principia á marchitarse cuando el suelo contiene aproximadamente el triple de la cantidad de agua que puede fijar por higroscopicidad (Mitscherlich). Se dice que la planta ha *muerto* cuando no puede revivir si se inmergen sus raíces en el agua. He aquí, respecto de este punto, dos experimentos hechos por el autor precitado que precisan bien lo que ocurre:

NATURALEZA DE LOS SUELOS	Suelo turboso	Suelo arenohumífero	Suelo arenoso	Suelo arenoarcilloso	Suelo arcilloso	OBSERVACIONES
Agua higroscópica en 100 partes de tierra seca. . .	18,8	2,01	1,05	1,54	2,37	—
Cantidades de agua contenidas en 100 partes de tierra seca						
Avena . . .	64,99	6,58	4,11	4,67	5,70	La planta principia á marchitarse.
	26.02	2,51	1,37	2,10	2.71	Algo antes de la muerte de la planta.
	23,60	2,16	0.93	»	2,36	Planta muerta.
Mostaza blanca . . .	50,10	5.52	2,91	»	»	La planta principia á marchitarse.
	26,6	2.84	1,82	2.33	»	Algo antes de la muerte de la planta.
	26,7	2.13	1.14	»	»	Planta muerta.

El suelo retiene, pues, enérgicamente cierta proporción mínima de agua que no le puede ser quitada, ni por evaporación en las condiciones ordinarias de temperatura en que ésta se efectúa, ni por la succión que ejercen las raíces y que es provocada por los fenómenos de transpiración.

V

PERMEABILIDAD DE LA TIERRA RESPECTO DE LOS GASES DE LA ATMÓSFERA

La presencia de gases en la tierra de labor es un hecho constante. Hemos indicado ya una manera de determinar, en una masa de tierra dada, el volumen total de estos gases. Se trata ahora de seguir sus movimientos como hemos seguido los del agua, y ver cuáles son los factores que entran en juego para facilitar ó retardar su circulación. Existe alguna analogía entre los movimientos de los gases en el suelo y los del agua; las causas que influyen en la permeabilidad del suelo respecto del agua son bien á menudo las mismas que intervienen cuando se trata de la permeabilidad del suelo para los gases.

En efecto, podemos decir con Ammon que la permeabilidad de un suelo para el aire depende de tres factores: el tamaño de los granos, el estado de apretadura y la riqueza del suelo en agua. Cuanto más finos son los granos, más considerables son los rozamientos del aire: el paso de los gases es, pues, tanto más difícil cuanto más finos son los granos y, recíprocamente, tanto más fácil cuanto mejor trabajada ha sido la tierra. Para una misma tierra, el paso del rodillo, en el caso de que esta operación mecánica haya sido muy enérgica, puede hacer que la permeabilidad de la tierra respecto del aire sea cien veces más débil que antes de comprimirla. Como regla general, la permeabilidad para los gases disminuye también con la riqueza en agua. Se comprende, según estos datos, el interés que tiene la investigación de la permeabilidad de un suelo para el aire, porque esta noción está relacionada con la cuestión de saber qué cantidad de oxígeno será puesta á disposición de las raíces de las plantas: además, el oxígeno deberá asegurar el buen funcionamiento de todos los fenómenos oxidantes, químicos ó biológicos, que

conducen á la destrucción de la materia orgánica con formación de gas carbónico. El papel de este último, como solubilizador de los elementos minerales, ha sido examinado anteriormente, pero volveremos á ocuparnos en él á continuación por otras razones.

Entre los muchos procedimientos que han sido propuestos para estudiar prácticamente la circulación de los gases en el suelo, no nos fijaremos más que en el empleado por Dehérain y Demoussy. La manera de operar estos sabios es un poco ficticia; no da más que resultados cualitativos, pero suministra con todo interesantes informaciones sobre la permeabilidad de las componentes del suelo por una parte, y de la tierra vegetal por otra. El aparato de Dehérain y Demoussy está representado en la adjunta figura (figura 5).

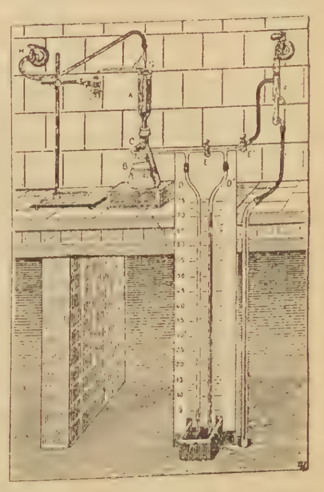


Fig. 5.

En una alargadera *A*, se introduce cierto peso (unos 150 gramos) de la materia que quiere ensayarse y cuyo arrastre se impide mediante un disco de tela metálica que se coloca en la parte inferior de la alargadera. Esta se une con un tapón al cuello de un frasco cónico *B* tubulado, cuya tubuladura *C* está enlazada con un tubo de vidrio horizontal en el cual están soldados dos tubos manométricos verticales de 80 centímetros de altura *DD'* que están inmergidos en una pequeña cubeta de mercurio. En *E* y *E'* hay dos llaves de vidrio. El tubo horizontal comunica finalmente con una trompa de agua *F*.

Si se quiere operar con una substancia húmeda, se puede, previamente, dar á ésta el grado de humedad que se quiera; ó bien, si se trata de imitar la acción de la lluvia, se pulveriza cierta cantidad de agua mediante un pulverizador que funciona mediante un fuelle hidráulico *H*. Se puede también verter de una vez en la alargadera una cierta cantidad de agua, lo que reproducirá los fenómenos que acompañan á la caída de una lluvia violenta ó la presencia del agua de inundación. Es importante emplear primero elementos ó tierras en estado seco, y después operar en seguida con estas mismas mate-

rias húmedas ó embebidas de agua. Veamos ahora qué datos pueden obtenerse haciendo funcionar este aparato.

Supongamos que se introduce en la alargadera tal ó cual materia y que se hace funcionar la trompa de agua *F*. Si esta materia no presenta, por efecto de su estructura ó de su grado de humedad, resistencia apreciable al paso de los gases, la cantidad de aire que atraviesa la substancia es igual á la que arrastra la trompa, y el mercurio no sube en los tubos manométricos. En este caso, pues, la permeabilidad es absoluta. Pero si el paso del aire al través de la substancia es algo difícil, el mercurio se eleva á cierta altura en los tubos manométricos. Si la resistencia de la substancia es absoluta, el mercurio podrá elevarse hasta una altura de 74 centímetros como término medio. Supongamos el vacío obtenido en el aparato y que el mercurio llega en los tubos *D* y *D'* á 74 centímetros. Se cierran las llaves *E* y *E'* y así se aísla el manómetro *D'* del resto del aparato. Si la substancia introducida en *A* conserva una impermeabilidad absoluta, el mercurio del manómetro *D* seguirá fijo y su altura será la misma que la del manómetro testigo *D'*. Pero si la substancia no es impermeable, se verá, al cabo de un tiempo mayor ó menor, que el mercurio desciende en el tubo *D*.

¿Cómo se comportan los diversos componentes de la tierra?

Permeabilidad de los componentes de la tierra.—

Arena.—Cuando ésta es seca, cualquiera que sea su grado de finura, siempre goza de una permeabilidad absoluta. Si se ha mojado mediante una pulverización de agua, la permeabilidad todavía es absoluta; si se ha vertido un exceso de agua en su superficie, el mercurio primero sube en los tubos, pero luego baja rápidamente. Así, la arena es un elemento esencialmente permeable á los gases. Con todo, se debe observar aquí que la diferencia de presión que existe entre el aire exterior y la atmósfera interior del frasco *B* es incomparablemente mayor que la que, normalmente, puede haber entre el aire exterior y la atmósfera interior de un suelo. No debe, pues, atribuirse á la arena muy fina y embebida de agua una permeabilidad absoluta análoga á la que expresa el experimento que acabamos de citar; porque, como hemos dicho anteriormente (pág. 154), los suelos formados por granos arenosos extremadamente finos escurren con mucha lentitud. Sus canales capilares se vacian muy difícilmente y, por consiguiente, su impermeabilidad á los gases es casi absoluta. Estos suelos reciben el nombre de *asfixiantes*.

Arcilla.—Si se pone en la alargadera *A* caolín mojado y se hace funcionar la trompa *F*, la resistencia al paso del aire hace subir el mercurio en los manómetros; esta resistencia aumenta cuando se vierte de una vez cierta cantidad de agua sobre el caolín: esta agua se infiltra con dificultad, y si la cantidad de agua es suficiente para saturar la arcilla y ocasionar un principio de escurrimiento, éste es

sumamente lento. Por esto se observa la ascensión del mercurio en los manómetros hasta 74 centímetros de altura. La impermeabilidad es, pues, absoluta. Además, es *duradera*. A menudo persiste muchos días y sólo cesa cuando se ha escurrido la mayor parte del agua, lo que á veces requiere largo tiempo.

CALCÁREO.—El blanco de Meudon ó la creta pulverizada, puestos en la alargadera *A*, muestran una perfecta permeabilidad mientras son secos. Pero, la adición de una pequeña cantidad de humedad, y sobre todo un exceso de este líquido vertido de una vez, producen una impermeabilidad que se acerca á la de la arcilla. Sin embargo, el escurrimiento del líquido es más rápido que en esta última y, por consiguiente, la impermeabilidad del calcáreo, cuando está embebido de agua, dura menos tiempo que la de la arcilla.

HUMUS.—Si se emplea el humus, aislado por el procedimiento que hemos expuesto en la página 149, se observa que, seco ó húmedo, este humus es muy permeable por los gases de la atmósfera, aun cuando pueda retener á veces cerca de 40 por 100 de su peso de agua cuando todo escurrimiento de este líquido haya cesado en el vaso *B*.

Así, de los cuatro elementos que componen la tierra de labor, dos, la arena y el humus, son permeables al agua y á los gases; los otros dos son poco ó nada permeables, suponiendo, bien entendido, que ninguna hendidura venga á destruir la continuidad de la masa. La dimensión de los granos desempeña, pues, un papel capital en la cuestión de la circulación más ó menos fácil de los flúidos. En el caso de una tierra determinada, respecto de la cual el análisis físico (véase capítulo VI) habrá indicado las cantidades respectivas de arena, arcilla, etc., se podrá prever, *a priori*, el grado de permeabilidad, según que dominen en esta tierra los elementos gruesos ó los elementos finos; según que sea *ligera*, esto es, *arenosa*, ó *pesada*, esto es, *arcillosa*.

PERMEABILIDAD DE LA TIERRA.—El aparato que acabamos de describir puede servir igualmente para la determinación de la permeabilidad de las tierras. Para obtener resultados concordantes con una misma tierra, es indispensable que las diversas muestras estén igualmente apretadas mediante repetidas sacudidas. Haremos algunas breves indicaciones sobre este asunto.

Una tierra seca es siempre permeable para los gases; cuando recibe agua de lluvia (mediante el pequeño pulverizador), y esta agua se introduce en el interior de la masa á medida que va cayendo, la permeabilidad, aunque algo menor que en el caso de la tierra seca, queda sin embargo siempre asegurada, porque la arcilla continúa coagulada á causa de la relativa lentitud con que la lluvia cae. Como regla general, cuanto más numerosos son los espacios vacíos, mayor es la permeabilidad de la tierra. Si los huecos son iguales, la

permeabilidad está en razón inversa de la proporción de arcilla (Garola). Pero, si se vierte de una vez sobre la tierra contenida en la alargadera una gran cantidad de agua, imitando así lo que ocurre en las lluvias torrenciales, se ve que el mercurio sube en los manómetros; á veces se llega al vacío completo. Es raro que este estado de cosas persista: cuando la superficie de la tierra deja de estar inundada de agua, la permeabilidad reaparece, aunque lentamente.

La *distribución del agua* en el suelo, en los dos casos del agua de lluvia y del agua de inundación, es muy diferente. Como han enseñado Dehérain y Demoussy, se llega á la conclusión, aparentemente paradójica, de que una tierra de composición media retiene menos agua, para un peso dado de materia, después de grandes lluvias que han inundado su superficie, que cuando ha recibido lluvias moderadas capaces, sin embargo, de mojarla en su totalidad. Se puede explicar esto de la siguiente manera: Una lluvia moderada desagrega la superficie del suelo; cuando atraviesa la tierra, el agua disuelve una proporción suficiente de calcáreo para mantener la arcilla coagulada (pág. 107); también los espacios intersticiales del suelo almacenan agua, ya que no ha intervenido causa alguna que pueda estrechar sus dimensiones. Por el contrario, en el caso del agua de inundación, la lluvia no se carga de una cantidad suficiente de calcáreo, la arcilla entra en suspensión y determina, á lo menos momentáneamente, la obstrucción de los canales capilares del suelo. Las partículas arenosas más finas, impelidas de arriba abajo por la violencia del choque de la lluvia, se introducen poco á poco en estos canales: por esto la mayor parte del agua de inundación permanece largo tiempo en la superficie del suelo sin poder penetrar en su interior. Los espacios intersticiales así obturados por la arcilla coloide y la arena fina no dejan sitio al agua: lo que justifica la precedente afirmación.

La tierra vegetal no condensa los gases de la atmósfera. Se admitía antes que la tierra vegetal, materia esencialmente porosa, era capaz de absorber cierta cantidad de gases de la atmósfera, especialmente oxígeno, y de retener este gas cuya acción se manifestaría ulteriormente por la producción de ciertos fenómenos químicos. La energía de las combustiones en muchos suelos, la oxidación considerada directa del nitrógeno con formación de nitratos, parecían confirmar esta opinión. En otras palabras, la tierra podría comportarse como la esponja de platino, por ejemplo. Schlesing ha demostrado que no existía esta pretendida propiedad de condensación. Para dar esta demostración, se extrae con la trompa de mercurio la totalidad de los gases contenidos en una masa determinada de tierra, se llenan en seguida con

agua hervida los espacios vacíos y se compara el volumen del agua absorbida con el de los gases extraídos, habiendo sufrido éstos las correcciones necesarias de temperatura y de presión. También deben efectuarse otras correcciones, debidas á que la tierra empleada presenta, al principio, cierta cantidad de humedad y que ha disuelto, á causa de la presencia del agua, algo de los gases nitrógeno, oxígeno y ácido carbónico. Schlœsing llega como resultado experimental á la conclusión de que el volumen del agua introducida en la tierra vegetal es rigurosamente igual al de los gases extraídos, reducidos á la temperatura y á la presión observadas en la masa de tierra inicial y determinados al principiar el experimento.

Cohesión ó tenacidad de la tierra. - El procedimiento empleado por Schübler para medir la cohesión de una tierra es muy imperfecto. Este autor malaxaba con agua, ya diferentes tierras, ya los elementos de las mismas, y moldeaba la pasta así obtenida dándole la forma de prismas de las mismas dimensiones. Cuando estos prismas estaban bien secos, ponía sus dos extremidades sobre sustentáculos y suspendía del medio del prisma un platillo de balanza que cargaba de pesos hasta conseguir la ruptura. Las tierras dispuestas de esta manera se encuentran en un estado de apelmazamiento mucho mayor que en estado natural; además, la formación de grietas durante la desecación de algunas muestras ó la presencia en el interior de los prismas de guijarros más ó menos voluminosos, constituyen otras tantas causas de disminución de resistencia. Por esto las cifras obtenidas por este procedimiento son poco utilizables.

Adherencia. Sobre cierta cantidad de tierra embebida de agua al máximo, Schübler aplicaba un disco de madera de tal manera que hubiese perfecto contacto entre la tierra y el disco. Se sujetaba éste á uno de los platillos de una balanza. En el otro platillo se ponían pesas hasta que el disco se desprendía de la tierra. Como se comprende, la arcilla produce el máximo de adherencia. Pero, dos experimentos consecutivos, hechos con la misma substancia, no dan siempre idénticos resultados á causa de ser desigual la adherencia en los dos casos. El trabajo hecho en el laboreo de las tierras, porque á esto tienden los experimentos de Schübler, se mide directamente en el campo por medio de los dinamómetros.

Contracción. — Cuando una tierra húmeda se deseca disminuye de volumen, se *contrae*. Esta contracción es más ó menos notable según sean los elementos que componen la tierra. En el caso de las

tierras arcillosas, esta contracción ocasiona la formación de rendijas de cuya producción perjudicial nos ocuparemos más adelante. La disminución en longitud de prismas iguales, moldeados como los que utilizaba para determinar la cohesión, servía á Schübler para medir la contracción de las diferentes tierras. Una determinación de esta naturaleza es casi ilusoria.

VI

RELACIONES ENTRE EL CALOR SOLAR Y EL SUELO

Emisión del calor solar. - La cantidad de calor que lleva el sol á cada unidad de superficie depende de la *duración de la insolación*, de su *intensidad* y de la *inclinación* de la superficie considerada respecto de los rayos que recibe. La intensidad calorífica ó luminosa recibida por una superficie determinada varía proporcionalmente al seno de la inclinación de los rayos solares respecto de la superficie *(ley de Lambert)*. Es, pues, la máxima, cuando el ángulo bajo el cual caen los rayos es igual á 90°; la mínima, cuando este ángulo es nulo, esto es, en el caso de una incidencia rasante.

La cantidad de calor, medida con el actinómetro, que recibe en cada instante una misma superficie del suelo, es extremadamente variable. Sin embargo, la temperatura del aire varía poco y lentamente, porque depende de la suma de calor anteriormente recibida. Si la cantidad de calor venida exclusivamente del sol experimenta muy grandes oscilaciones de un instante á otro, es debido á la presencia del vapor de agua invisible, desigualmente esparcido en el aire, y que constituye el principal elemento absorbente del calor (Duclaux).

Se evalúa en unas 67000 calorías la cantidad de calor que llega anualmente del sol á un centímetro cuadrado de superficie en Montpeller, y en 129000 la cantidad correspondiente en el ecuador á una superficie igual (Crova). Pero, si se hiciera este cálculo refiriéndolo solamente á los días de mucho sol sin tener en cuenta, aun cuando sólo pueda

hacerse de un modo aproximado, los días cubiertos como en las evaluaciones anteriores—se hallarían cifras mucho más elevadas. Suponiendo el sol vertical y el cielo muy puro, Langley llega á la cifra aproximada de 876000 calorías durante un año en la superficie de un centímetro cuadrado.

La intensidad de la insolación aumenta con la altitud, á causa de la disminución de la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera á medida que se eleva. Se admite, como término medio, que, para 100 calorías de un haz de rayos solares que vaya á parar normalmente á los límites de la atmósfera, ésta, cuando es pura, retiene 33 y no deja llegar á la superficie del suelo más que 67.

La absorción aumenta con la oblicuidad de los rayos solares. Así, en una misma localidad, esta absorción varía con la altura del sol, esto es, con la hora del día (Duclaux).

Temperatura del suelo.—El suelo se calienta en contacto con los rayos solares; este calentamiento tiene gran importancia respecto de la vegetación. En las condiciones ordinarias, el calentamiento del suelo no es debido más que á la influencia solar; porque, si bien es verdad que las múltiples fermentaciones que en el suelo se efectúan pueden desprender cierta cantidad de calor (acumulación de materias húmicas bajo la protección de grandes árboles), éste á menudo es poco notable y se produce en un espacio de tiempo generalmente largo: de manera que este calor se disipa en gran parte por radiación y no produce en el suelo más que una elevación de temperatura insignificante. No puede decirse lo mismo respecto de ciertas fermentaciones cuya acción calorífica se acumula en un espacio restringido: el suelo puede calentarse entonces muy notablemente. Este es el conocido efecto que buscan los hortelanos cuando ponen capas de estiércol que recubren en seguida de una cubierta de vidrios. Según ciertos autores, la descomposición de los abonos verdes produciría una cantidad de calor mayor que la del estiércol á igualdad de peso.

Ocupémonos sólo en el calor solar como fuente de calor que beneficia á la tierra vegetal. Cuando el sol envía sus rayos al suelo, éste

se calienta primero en su superficie; después, por efecto de los fenómenos de conductibilidad, variables con la naturaleza del suelo considerado; este calor penetra poco á poco en las capas subyacentes y esta penetración es tanto más profunda cuanto más tiempo se haga sentir la fuente calorífica. Cuando esta fuente desaparece durante la noche, la superficie del suelo pierde calor por radiación y se produce un movimiento inverso del calor, de las capas profundas á la superficie.

Existe en todos los suelos cierta capa cuya temperatura permanece constante todo el año, y cuya profundidad varía con la conductibilidad propia del suelo considerado.

Este calor que la tierra retiene depende, no sólo de su conductibilidad, sino también de su grado de humedad y de su color. Está también en relación directa con la intensidad de la acción solar: por lo tanto, la duración del día y la inclinación de los rayos ejercen una influencia capital.

Por lo que se refiere al calentamiento de los diversos componentes de los suelos, se puede admitir, con Wollny, que, cuando sube la temperatura (durante la insolación y en verano), el cuarzo es el componente que más se calienta, después el calcáreo, la arcilla y el humus. Cuando la temperatura baja (en invierno y durante la noche), ocurre lo contrario: el cuarzo es el que se enfría más pronto y el humus el que se enfría más lentamente. Estas particularidades son atribuíbles á las diferencias que presentan los citados elementos con relación á su capacidad calorífica, su conductibilidad y la pérdida de calor por emisión. La capacidad calorífica de la arena es menor que la de la arcilla, porque esta última retiene mejor el agua: además, la arena conduce mejor el calor que la arcilla: por esto los suelos silíceos se calientan antes que los suelos arcillosos. Recíprocamente, durante el invierno ó durante la noche, la temperatura de la arena baja más que la de la arcilla, porque la arena conduce mejor el calor y su capacidad calorífica es menor que la de la arcilla. Si el humus se calienta lentamente cuando la temperatura exterior sube, es debido á su escasa conductibilidad y á su elevada proporción de agua: de lo que resulta mayor capacidad calorífica. Inversamente, cuando la temperatura baja, este humus se enfría con más lentitud que los demás elementos del suelo.

Wollny ha enseñado también que, durante el verano, el suelo es tanto más caliente, y en invierno tanto más frío cuanto mayores son sus partículas. Esta circunstancia es debida á que la proporción de humedad disminuye y la conductibilidad calorífica crece en razón del aumento del diámetro de las partículas térreas.

La proporción de agua del suelo influye de un modo muy notable en la elevación de su temperatura. Ésta es tanto menor en el verano cuanto mayor es la proporción de agua que la tierra contiene, porque el calor específico del agua es muy superior á la de los elementos que impregna (véase, más adelante, pág. 177) y es preciso, por consiguiente, mucho calor para calentarla.

Según Masure, la temperatura de la tierra tomada en la superficie puede llegar, durante el día, á sobrepujar en unos 15° á la del aire, si esta tierra es muy seca. Cuando está medio saturada, la diferencia no es más que de 5° en favor de la tierra; sería solamente de 1°.5 cuando la tierra está saturada de agua. Durante la noche, las diferencias son menos marcadas; la tierra se vuelve más fría que el aire ambiente cuando un cielo puro favorece la radiación, cualquiera que sea su grado de humedad.

Así, una gran cantidad del calor emitido por el sol se gasta en la evaporación del agua sin elevación de la temperatura.

Temperatura del suelo á diferentes temperaturas.– Es interesante seguir, durante un período algo largo, las variaciones de la temperatura del suelo á diferentes profundidades, á lo menos hasta un nivel accesible á las raíces de los árboles. Exponemos á continuación el resumen de las observaciones hechas respecto de este punto por Flammarion, en Juvisy (Seine-et-Oise), durante el año 1908.

MEDIA DE LAS TEMPERATURAS MENSUALES

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Del aire	0°	4°4	4°6	8°3	15°3	18°0	18°5	16°9	14°8	11°7	5°1	2°1
En la superficie del suelo.	0°6	5°1	6°8	11°3	19°1	23°2	24°0	22°0	18°5	14°0	6°8	4°6
A 0,25 metros . . .	1°6	4°7	5°8	9°8	15°8	19°4	20°9	20°5	18°5	15°2	8°2	5°6
A 0,50 » . . .	3°7	5°5	6°3	9°2	14°4	18°3	20°2	19°8	17°6	16°0	10°3	7°8
A 0,75 » . . .	5°0	5°5	6°4	8°7	12°5	16°1	18°4	18°3	16°6	15°4	10°6	8°2
A 1 metro.	6°0	5°6	6°5	8°4	11°8	15°3	18°0	18°5	17°2	16°1	12°1	9°3
A 1,50 metros . . .	7°9	7°0	7°6	9°3	12°1	14°4	17°5	18°8	18°2	18°1	15°0	11°9
Aguas á 13,80 metros.	10°8	10°7	10°8	11°1	11°5	11°6	11°8	11°8	11°6	11°6	11°3	11°1

Este cuadro muestra que las variaciones de la temperatura del suelo á diferentes profundidades siguen á las del aire. Durante los meses de diciembre, enero, febrero, las temperaturas crecen con la profundidad del suelo: en mayo, junio y julio, ocurre lo contrario.

El examen de las temperaturas medias mensuales, observadas á diversas profundidades (0,10 metros, 0,25 metros, 0,50 metros) *en*

el interior de un suelo cubierto de césped y de un suelo desnudo, muestran que la oscilación térmica anual presenta los mismos caracteres generales en los dos casos; las capas superiores del suelo cubierto de vegetación son más calientes en invierno que las de un suelo desnudo; por el contrario, son más frías en verano. La vegetación protege las capas subyacentes contra un calentamiento demasiado brusco en verano y un enfriamiento demasiado rápido en invierno (Flammarion).

Color del suelo. — El color del suelo ejerce una influencia que á menudo se considera notable respecto de la facultad que tienen las tierras de absorber las radiaciones solares. Esta coloración, por otra parte, es muy variable; las substancias contenidas en el suelo que actúan de una manera cierta respecto de la absorción calorífica son el humus, que es negro, y el óxido férrico, que es rojo. Los silicatos que contienen este óxido abundan más en el suelo que el óxido férrico libre. Se puede formar concepto de la acción de las substancias coloreadas de la manera siguiente: Si se toman dos muestras de arena blanca y se exponen al sol, señalarán la misma temperatura. Si se espolvorea una de las dos con negro de humo, se observará una diferencia de temperatura de 7 á 8° á favor de esta última muestra.

Parece resultar de esto que, en las mismas condiciones de exposición, en un suelo arenoso poco coloreado la vegetación será más tardía que en un suelo muy coloreado. Pero esto solamente es cierto en verano y cuando se trata de una fuerte insolación. Según Wollny, estas diferencias de temperatura, debidas á la diferencia de coloración, se atenúan más ó menos en invierno cuando la insolación es débil. En realidad, la cuestión de la coloración del suelo es secundaria respecto de la absorción de los rayos caloríficos; la proporción de agua de un suelo tiene en este punto una influencia mucho más marcada.

Calor específico. — El calentamiento ó el enfriamiento del suelo están en relación directa con su calor específico. Sin embargo, el calor específico de los elementos, suponiéndolos secos, que constituyen el suelo, tiene una importancia secundaria, porque, en las condiciones ordinarias, estos elementos

son más ó menos húmedos; lo cual tiende á aumentar el calor específico que les es propio. Resulta de aquí que un suelo, cualquiera que sea su naturaleza, que contenga mucha agua, exigirá para calentarse una cantidad de calor mucho mayor que cuando esté seco: tanto si se trata de esta mezcla compleja que se llama tierra de labor, como de sus componentes separados.

Recordamos que se da el nombre de *calor específico* de una substancia al número de calorías que es preciso darle para elevar un grado la temperatura de 1 gramo de esta substancia. La unidad de calor ó *caloría*, es la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1° un gramo de agua que esté á 15°. Las cifras que se han dado relativas á esta constante física aplicada á los elementos de la tierra son bastante divergentes según los diferentes autores. Se pueden admitir las siguientes (Lang):

	Calor específico de los elementos
Arena	0,196
Arcilla	0,233
Calcáreo.	0,214
Turba	0,477

Según esto, para aumentar en 1° la temperatura de un kilogramo de arena, de arcilla ó de calcáreo, se necesita una cantidad de calor aproximadamente cinco veces menor que la que se requiere para elevar de 1° la temperatura de un kilogramo de agua. En cambio, la turba tiene un calor específico que es casi la mitad del del agua. Por lo tanto, se calentará mucho más lentamente que los elementos minerales propiamente dichos del suelo. Si se refiere el calor específico, no ya á la cantidad de peso, sino á la *unidad de volumen*, multiplicando los calores específicos precedentes por los pesos específicos que corresponden á los elementos, los cuales varían en sentido inverso de los calores específicos, se encuentran números bastante aproximados unos á otros.

El calor específico de la *unidad de volumen* estaría representado entonces por:

	Calor específico		Pesos específicos		Calor específico para la unidad de volumen
Arena	0,196	×	2,50	=	0,490
Arcilla.	0,233	×	2,36	=	0,549
Calcáreo	0,214	×	2,60	=	0,556
Humus	0,477	×	1,23	=	0,586

Lo que significa que se requiere, poco más ó menos, la misma cantidad de calor para hacer subir de 1° una capa de igual espesor

de los 4 elementos citados, *suponiéndolos secos y sin contener aire interpuesto*.

Pero, si se tiene en cuenta el aire interpuesto, como ocurre en las condiciones naturales, el calor específico, referido á la unidad de volumen, se encuentra grandemente modificado. Esto es lo que ha demostrado E. A. Mitscherlich de la siguiente manera:

El calor específico de un centímetro cúbico de aire es igual á 0,000306, es decir, que es despreciable en el presente cálculo. Si se admite que la arena seca, que tenga el volumen de 1 litro, contiene 41,5 por 100 de aire (por lo tanto; 58,5 de arena), su calor específico para la *unidad de volumen* será:

$$\frac{58{,}5 \times 0{,}49 + 41{,}5 \times 0}{100} = 0{,}286.$$

El humus que contiene por término medio 75,4 por 100 (por lo tanto, 24,6 de materia), daría:

$$\frac{24{,}6 \times 0{,}586 + 75{,}4 \times 0}{100} = 0{,}144.$$

Si se tiene en cuenta, no sólo el aire, sino también el agua que contienen todos los suelos en mayor ó menor proporción, se llega á cifras muy diferentes de las precedentes. El calor específico de los elementos aumenta entonces á causa de la elevada capacidad calorífica del agua. Así, tomando como ejemplo la arena común, si se supone que el volumen de los espacios vacíos que hemos admitido que era igual á 41,5, está ocupado por mitad por agua y por aire, el calor específico, para la unidad de volumen (siendo el calor específico del agua igual á 1), será:

$$\frac{58{,}5 \times 0{,}49 + 20{,}75 \times 0 + 20{,}75 \times 1}{100} = 0{,}494.$$

El calor específico de los elementos constituyentes del suelo y, por consiguiente, el del mismo suelo, se aproxima tanto más al del agua, esto es, á la unidad, cuanto mayor sea la proporción de ésta contenida en estos elementos ó en el suelo.

En este concepto, un suelo formado sólo por humus y saturado de agua tendría un calor específico próximo á 0,9.

Conductibilidad del suelo para el calor.—La conductibilidad para el calor de los elementos componentes del suelo es débil; depende del tamaño de los granos, de su estructura y de su proporción de agua. El tamaño de los granos ejerce una marcada influencia. La conductibilidad calorífica es mucho

mayor en una roca compacta que en la misma roca pulverizada. Si el polvo de la roca se comprime fuertemente, su conductibilidad crece. También, cuando una tierra ha sido esponjada en la superficie, almacena más calor que la misma tierra no trabajada ó comprimida; en efecto, en el primer caso, el calor que la superficie de la tierra absorbe se disipa menos fácilmente en las regiones inferiores. Esto es fácil de explicar observando que, en una tierra esponjada, las partículas están separadas unas de otras por una capa de aire muy mala conductora del calor. Si se disminuye el volumen aparente ocupado por la tierra sacudiéndola ó comprimiéndola, se disminuye con ello el volumen del aire que separa los elementos de la tierra, y se vuelve ésta conductora del calor.

La proporción de agua de una tierra ejerce también una notable influencia en su conductibilidad. El agua conduce mal el calor; sin embargo, lo conduce mejor que el aire. Basta humedecer ligeramente la tierra para hacerla mucho más conductora que cuando estaba seca. Entre la arena y el carbonato cálcico secos y estas mismas substancias completamente impregnadas de agua, pero escurridas, la conductibilidad varía casi de uno á dos. Este hecho es fácilmente explicable: el agua substituye, entre las partículas sólidas, á un volumen igual de aire; éste, muy mal conductor, es desalojado por una substancia que conduce mejor el calor.

VII

CALENTAMIENTO DEL SUELO Y DE SUS COMPONENTES EN CONTACTO CON EL AGUA

Si se pone en contacto con el agua una substancia pulverizada cualquiera, bien desecada é incapaz de disolverse en este líquido ó de combinarse con él, la masa se calienta. Parece, pues, *a priori*, que debe haber desprendimiento de calor cuando una tierra seca se encuentra en presencia del agua; se puede también considerar como probable que un componente de la tierra producirá, en estas condiciones, más

calor que otro. Es necesario tener respecto de este punto algunos datos exactos, y determinar cuál puede ser, en las condiciones naturales, la importancia práctica del calor desprendido durante la humectación. De todos modos, si bien es interesante, desde el punto de vista teórico, examinar el desprendimiento de calor que ocurre en el contacto del agua con una muestra de tierra *bien seca*, es evidente que, en la naturaleza, este caso no se presenta nunca: la tierra, cualquiera que sea la temperatura á que haya estado sometida y cualquiera que sea, por consiguiente, su grado de sequedad, contendrá siempre cierta proporción de agua. Ésta no se desprende más que cuando se expone la tierra á temperaturas mucho más elevadas que las en que se halla en las condiciones normales. Pero, á partir de cierto límite, esta elevación de temperatura es incompatible con la vida de los microbios que el suelo contiene y con la existencia de los vegetales cuyas raíces alimenta. Por otra parte, es útil hacer observar de paso que la temperatura de 110° á que se somete ordinariamente la tierra para hacerle perder su agua es puramente convencional. En efecto, algunos silicatos alcalinos, en este momento, han perdido parcialmente cierta cantidad de agua de constitución; el resto sólo se desprende á una temperatura mucho más elevada capaz de alterar, á su vez, los elementos orgánicos que la tierra contiene. Sin embargo, esta temperatura de 110°, aplicada á la desecación, es la que sirve habitualmente para definir una tierra seca.

Se deben á Mitscherlich (1901) muchas determinaciones del calor desprendido cuando una tierra se pone en contacto con el agua. Estas determinaciones resultan de experimentos hechos empleando el calorímetro de hielo de Bunsen. Los ensayos han sido hechos con tres series de tierras que contenían cantidades crecientes de humedad. Citemos solamente algunas de las cifras obtenidas; las calorías desprendidas se refieren á un gramo de substancia.

Una tierra turbosa, con una proporción primitiva de agua de 0,16 por 100, ha desprendido 17,5 cal.; con una proporción de agua de 10,51, 3,84 cal.; una tierra exclusivamente arcillosa, con una proporción de agua igual á 0, ha desprendido 15,10 cal.; con una proporción de agua de 9,99 por 100, 3,04 cal.; con una proporción de agua de 26,21, 0; una tierra arenosa, con una proporción de agua igual á 0, ha desprendido 0,81 cal.; con una proporción de agua de 0,33.

0,23 cal. De modo que la tierra turbosa y la tierra arcillosa han desprendido notables cantidades de calor, tanto mayores cuanto más secas eran y llegando á ser nulas para cierta proporción de agua.

Recientemente (1909), Müntz y Gaudechon se han vuelto á ocupar de este estudio de un modo mucho más completo; no sólo han examinado un gran número de tierras, sino que han extendido sus investigaciones á los componentes de la tierra aislados por los procedimientos ordinarios del análisis mecánico: se puede así determinar á cuáles de estos componentes son imputables los fenómenos térmicos, y estudiar la relación que debe existir entre las cantidades de calor desprendidas y el grado de finura de los elementos.

Las tierras y sus componentes se desecaron en la estufa á 110° hasta peso constante; las cantidades de calor desprendidas fueron determinadas mediante el calorímetro de Berthelot operando con cantidades de substancia variable de 10 á 30 gramos en presencia de 250 gramos de agua. El calor específico de la tierra y de sus componentes fué tomado como igual á 0,2; los resultados están expresados en *grandes calorías* y referidos á un kilogramo de materia seca.

Se pasaron por el tamiz de mallas de 1 milímetro todas las muestras de tierra, y se las consideró como representando las tierras naturales. Sus diversos componentes fueron determinados según el método fisioquímico de Schlœsing (véase más adelante, pág. 198) y el método mecánico recomendado por Kopecky (pág. 212).

Efectos térmicos obtenidos con diversas tierras.— Las cantidades de calor desprendidas en el contacto del agua con las tierras secas más diversas son extremadamente variables (de 1 cal. á 12 cal.). Las tierras que contienen más arcilla, y sobre todo materia orgánica, son las que dan los mayores efectos térmicos. Si, por métodos físicos, se fracciona la tierra en una serie de partes de dimensiones decrecientes, se observa que el calor desprendido aumenta con el grado de finura de las partículas. Las tierras arcillosas son las que dan el efecto térmico máximo. He aquí un ejemplo:

	Proporciones centesimales de los componentes de la tierra examinada	Calorías producidas por kilogramo de materia
Arena gruesa > 0,1 mm. .	11,3	0
Arena fina comprendida entre 0,05 mm. y 0,1 mm. . .	16,52	0,26 cal.
Limo arenoso comprendido entre 0,01 mm. y 0,05 mm.	44,89	0,64 cal.
Limo arcilloso < 0,01 mm.	27,29	3,10 cal.
	100,00	

Los citados autores, para comprobar el valor del método empleado, han calculado la cantidad de calor que debe desprender un kilogramo de la tierra teniendo en cuenta la proporción de sus diversas partes y las cantidades de calor que desprende cada una de éstas separadamente. En el presente caso, el cálculo da, para un kilogramo de tierra, un desprendimiento de 1,16 cal., mientras que la *tierra total* da 1,14 cal.

Cuando la proporción de materia orgánica es considerable en los elementos clasificados según el grado de su finura, se debe tener en cuenta y hacer una corrección en el efecto térmico observado, para no referirlo á los elementos minerales solos. Porque, de todos los componentes del suelo, la materia orgánica es la que desprende más calor en contacto con el agua (20 cal. como término medio por kilogramo, según los autores).

Efectos térmicos producidos por los elementos aislados. —Arcilla. Reducidas por levigación á estados de finura comparables, las arcillas, según su procedencia, desprenden en contacto con el agua cantidades muy variables de calor (2,9 cal.; 6,8 cal.; 15,2 cal. respecto de tres arcillas de origen distinto). Estas tres arcillas, calcinadas al rojo, perdían respectivamente 11,9, 10,4, 8,9 por 100 de su peso: en esta nueva forma, su calor de humectación se reduce respectivamente á 1,5 cal., 1,8 cal., 1,1 cal. Por lo tanto, se puede admitir, como un hecho general, la pérdida de aptitud de una arcilla para desprender calor en contacto con el agua después de una fuerte calcinación que le ha quitado su agua de constitución, aun cuando conserva todavía un estado de gran división. Es probable que la condensación molecular que aumenta por efecto de la calcinación es la causa de la disminución del calor obtenido cuando se inmergen en el agua las arcillas calcinadas.

Materia orgánica.—Tanto si esta materia se presenta en forma de restos vegetales conservando aún su forma, como en estado de ácido húmico ó de humato de cal extraído del mantillo, desprende siempre una notable cantidad de calor en contacto con el agua, descontando las materias minerales que contiene. Esta cantidad de calor, más elevada que en el caso de las arcillas, varía de 20 á 26 calorías por kilogramo de materia seca La turba da cifras análogas. Müntz y Gaudechon han obtenido igualmente notables desprendimientos de calor con la fécula de patata, el almidón, el papel, el serrín de madera, las hojas pulverizadas: todas substancias insolubles en el agua.

Carbonatos y óxidos.—Los carbonatos de calcio y de magnesio, preparados por precipitación, el blanco de Meudon, los óxidos de hierro y de aluminio, desprenden, por el contrario, una pequeña cantidad de calor en contacto con el agua.

Origen de los desprendimientos de calor observados. —Dejemos á un lado la materia orgánica que, como hemos dicho, desprende grandes cantidades de calor. Si se examinan, primero con el microscopio y después con el ultramicroscopio, los fragmentos minerales de la tierra, y si se comparan los resultados de estas observaciones con los desprendimientos de calor obtenidos, se observa que los fragmentos de dimensiones claramente apreciables, de formas más ó menos geométricas, no producen, en contacto con el agua, ningún efecto térmico; las partículas finas que aun tienen determinada figura, pero cuyas dimensiones lineales son difíciles de apreciar á causa de su pequeñez, producen un efecto térmico poco apreciable. Los *materiales ultramicroscópicos,* formados por la arcilla coloide, por el contrario, son los únicos que producen un notable desprendimiento de calor, y á ellos se deben atribuir los efectos térmicos de las arcillas puestas en contacto con el agua.

Influencia de la fijación anterior del agua en el desprendimiento de calor.—Hemos dicho antes que la cantidad de calor desprendida en el contacto de una tierra con el agua disminuía á medida que aumentaba el grado de humedad de esta tierra.

Müntz y Gaudechon ponen en una atmósfera húmeda, á una temperatura poco variable, muestras de tierra de finura creciente. Determinan las cantidades de calor desprendidas midiendo al mismo tiempo el aumento de peso debido á la absorción del agua, hasta el momento en que este peso queda invariable; en otros términos, cuando se ha establecido equilibrio entre la humedad de la tierra y la de la atmósfera. La experiencia enseña que, en el caso de elementos gruesos, la absorción de una muy escasa cantidad de agua basta para hacer nulo el desprendimiento de calor producido en el contacto de estos elementos con el agua. Si los elementos son más finos, el efecto térmico decrece rápidamente con el aumento creciente de agua absorbida; pero no hay rigurosa proporcionalidad entre el calor desprendido y el grado de sequedad. En general, cuanto más calor desprende una arcilla en contacto con el agua, tanto más apta es para fijarla en una atmósfera húmeda.

Por lo que se refiere á la materia orgánica (humus, turba), se han observado hechos análogos á los precedentes: disminución del efecto térmico en el contacto con el agua á medida que el grado de hidratación de estas substancias aumenta; aptitud mayor para la

fijación de la humedad ambiente correspondiente á un mayor efecto térmico observado en el contacto con el agua líquida. Conviene hacer notar que el estado de división de las materias orgánicas no tiene ninguna influencia sobre su calentamiento en contacto con el agua. Solamente intervienen en este desprendimiento los efectos de porosidad, á la inversa de lo que ocurre en los elementos minerales, respecto de los cuales el grado de finura de los elementos ejerce una influencia preponderante, ya que los desprendimientos de calor observados son atribuíbles á acciones de superficie.

Causas del calentamiento de las tierras y de sus componentes. – A fin de resolver si el calentamiento producido en el contacto del agua con las materias antes examinadas depende de una acción puramente física de afinidad capilar, ó de un fenómeno químico de hidratación, Müntz y Gaudechon han determinado el calor desprendido por arenas de diferente grueso, arcilla, turba, puestas en contacto por una parte con agua, y por otra parte con bencina: este último líquido era, *a priori*, muy poco capaz de formar combinaciones con las materias indicadas. Por lo que toca á las arenas de distinto grueso, se observa siempre con la bencina un desprendimiento de calor, pero inferior al que da el agua. Este desprendimiento, como en el caso del agua, aumenta todavía con el grado de finura de los elementos. Las diferencias térmicas son mucho más acentuadas en el caso de la arcilla y, más aún, en el caso de la turba, donde son considerables. Así, una turba del Oise, un kilogramo de la cual desprendía en contacto con el agua 25,1 calorías, no desprendió, en contacto con la bencina, más que 0,7 calorías. Por lo tanto, del efecto térmico total obtenido en el contacto con el agua, una parte, muy pequeña, es debida á una causa puramente física: el resto es imputable á fenómenos de hidratación. Pueden ponerse éstos de manifiesto poniendo la arcilla, la turba (y otros cuerpos, como fécula, etc.) en contacto con alcohol de 88° centesimales, cuya densidad se ha determinado exactamente en el estado inicial y volviéndola á determinar al cabo de algunos días: la densidad ha disminuído sensiblemente. Esto demuestra que las substancias citadas han sido capaces de deshidratar el alcohol y, por consiguiente, de unirse con una parte del agua que este alcohol contenía.

La conclusión que se puede formular es la siguiente: el desprendimiento de calor de las substancias examinadas puestas en presencia del agua *procede de una combinación química*.

Observados del modo que se acaba de indicar, los desprendimientos de calor no suministran ningún dato práctico sobre el valor agrícola de las tierras. Porque, según las mismas observaciones de Müntz y Gaudechon, si una tierra vegetal de buena calidad produce, en general, en contacto con el agua, una elevación de temperatura mayor que una tierra pobre, una tierra arcillosa, difícil de cultivar, una tierra turbosa, generalmente de muy mediano rendimiento, des-

prenden más calor que tierras vegetales propiamente dichas de valor agrícola superior. Pero si, desde este último punto de vista, el precedente estudio no ofrece más que un interés puramente teórico, no ocurre lo mismo cuando se considera la cuestión de la siguiente manera:

Pasando constantemente las tierras por alternativas de sequedad y de humedad, es probable que los fenómenos térmicos que, en un suelo determinado, acompañan á la humectación, tengan consecuencias relativas á la vegetación. Müntz y Gaudechon calculan por de pronto cuál puede ser el calentamiento de una capa de mantillo que, después de haber sido expuesta al sol, se ha desecado, y cuya temperatura ha subido á 40°. Supongamos que sobre este mantillo (un kilogramo del cual desprende 8 calorías al ponerse en contacto con el agua) cae una lluvia de 2 milímetros á la temperatura de 25°, y que esta lluvia penetre en el mantillo hasta la profundidad de 8 milímetros. El calor desprendido en esta acción del agua hará pasar el mantillo de 40° á 48°; y esta última temperatura puede ejercer una influencia nociva sobre la vegetación.

Independientemente de este cálculo, los autores, por medio de experimentos directos con el mantillo ó con turba, secados al sol, y después mojados con agua, han demostrado que las elevaciones de temperatura observadas pasaban á veces de 10° la temperatura inicial de la substancia seca; de donde deriva la posibilidad, observada varias veces, de fenómenos de quemadura en las plantas, si se supone, lo que por otra parte es de observación corriente, que una tierra ó un mantillo de color obscuro, expuestos á los rayos solares durante un día de verano, señalen en sus capas superficiales secas una temperatura de unos 50°. La caída de una lluvia podrá hacer subir un termómetro puesto en la masa hasta 60°. El calor así absorbido por las partículas de la superficie se propaga, disminuyendo débilmente de intensidad, á una profundidad bastante considerable.

VIII

TRABAJO DE LAS TIERRAS

Terminaremos este capítulo examinando rápidamente algunos puntos relativos al *trabajo del suelo*, sobre los cuales Dehérain ha insistido particularmente. Este estudio, de carácter práctico, deriva de una manera natural de las nociones que hemos adquirido respecto de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

El aire y el agua deben circular continuamente en el interior de la tierra de labor para asegurar el buen funcionamiento de la vida vegetal. Los espacios libres que dejan entre sí las partículas sólidas, tan poco homogéneas desde el punto de vista de su forma exterior como de su composición íntima, tienden, al cabo de cierto tiempo, á disminuir á causa del apelmazamiento que provoca la caída de la lluvia. Por otra parte, se forman nuevos espacios intersticiales á causa de la desaparición por combustión de los restos orgánicos que contienen casi todas las tierras, por lo menos en sus capas superiores. Pero no puede existir equilibrio entre estas dos acciones, una de las cuales estrecha los espacios vacíos, mientras que la otra los agranda; los fenómenos que apelmazan la tierra predominan mucho, en cuanto sus efectos, respecto de los fenómenos de destrucción de la materia orgánica que engendran nuevos espacios intersticiales. Es, pues, indispensable, y ya hemos insistido en este punto, aumentar de una manera artificial la capacidad del suelo para el aire y para el agua separando unas de otras, por una labor mecánica, las partículas de que está formado. Instintivamente, por otra parte, el hombre ha tratado siempre de aumentar el volumen del suelo, de destruir la costra más ó menos dura que recubre la superficie de una tierra en que quería sembrar una semilla. Numerosas son las teorías que han sido emitidas sobre la necesidad de estas operaciones antes de que se haya podido encontrar una explicación racional; pero, prescindiendo de toda noción científica, se sabía que la tierra *trabajada* era capaz de absorber cantidades de agua pluvial mucho mayores, y en menor espacio de tiempo, que la tierra abandonada á sí misma.

Esponjando el suelo se facilita el camino á las raíces, se activa su desarrollo; se efectúan con más regularidad los cambios de gases entre estas raíces y la atmósfera interna cuyo volumen se ha aumentado y cuya composición ha sido renovada. Además, cuando el agua de lluvia cae, penetra fácilmente en los nuevos espacios intersticiales poniéndose á disposición de los pelos absorbentes. Recíprocamente, cuando la tierra está apretada y el agua permanece en su superficie sin poder penetrar en ella, el oxígeno de la atmósfera interior desaparece poco á poco por efecto de fermentaciones, y el oxígeno del

aire exterior sólo puede penetrar con gran lentitud en la masa de la tierra así separada de la atmósfera por la capa de agua interpuesta. Las raíces sufren entonces una asfixia lenta y la planta muere.

Hablaremos más adelante de la composición normal de la atmósfera interna del suelo á propósito de los fenómenos químicos que en él se efectúan, y no estudiaremos, en las líneas que siguen, más que el trabajo del suelo desde el punto de vista puramente físico.

Las labores de otoño, después de la cosecha, están destinadas á romper la costra dura que cubre el suelo, á abrir zanjas en éste y á desmoronar la tierra apelmazada con estas capas superficiales. Es fácil comprender que las lluvias que caen, ya en esta época del año, ya más tarde, en invierno—en vez de resbalar en la superficie del suelo, si éste forma pendiente, ó de permanecer más ó menos largo tiempo en su superficie formando lagunas si el suelo es llano y de evaporarse entonces parcialmente sin provecho,—se infiltran fácilmente á través de una masa cuya continuidad se ha roto y cuyos espacios vacíos han sido agrandados. Entre una tierra apelmazada y una tierra muelle, sabemos que la capacidad para el agua puede variar de uno á dos, y aun más. El agua penetra, luego, más adentro: atraviesa en parte el suelo y va á parar al subsuelo. Tenemos, pues, aquí un precioso aprovisionamiento de líquido, que de este modo se substrae á la evaporación y del cual podrán aprovecharse las raíces en la primavera del año siguiente, cuando esta agua seguirá un camino inverso y subirá por capilaridad á la superficie. Cuando la labor ha roto los terrones voluminosos y se presentan las heladas, el agua, gracias al aumento de volumen que experimenta, los pulveriza ó, por lo menos, los divide en pequeños fragmentos. Pero si, por una ú otra causa, no se efectúa este desmenuzamiento, ó si la labor se ha dado sólo en la primavera, los terrones continúan en forma de masas compactas y resultan de ello para el cultivo graves inconvenientes que Dehérain ha puesto de manifiesto de la siguiente manera: Este autor determina, por un procedimiento especial, la cantidad de agua y de gases contenidos en un prisma de tierra cortado de un terrón. Si la cantidad de agua contenida en el terrón es grande, el volumen de aire que encierra

es pequeño, y recíprocamente; las cantidades de aire y de agua son complementarias y su suma está representada por una cifra mucho más pequeña, referida á 100 gramos de materia, por ejemplo, que la que se encontraría operando en tierras esponjadas. En un terrón de tierra las partículas están muy aproximadas y el aire no penetra más que á medida que se desprende el agua. De suerte que un terrón húmedo es poco aireado; no contiene aire más que cuando se deseca. Se deduce de esto que las condiciones favorables á la vegetación se encuentran difícilmente realizadas, porque estos terrones contienen demasiada agua y poco aire, ó una cantidad de aire suficiente, pero con escasa proporción de humedad. Cuando más arcillosa es la tierra, más fuertemente soldadas entre sí están las partículas térreas. Cuando los terrones se desecan y la lluvia no los moja nuevamente, adquieren una gran dureza; por esto las semillas que se pusieran en un medio semejante darían unos resultados muy mediocres. Por medio del rastrillo ó de rodillos de diversas formas, se consigue dividir estos terrones.

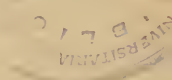
Hemos insistido anteriormente (pág. 118) en la notable diferencia que existe, desde el punto de vista de la capacidad para el agua, entre las tierras muy apelmazadas y las tierras bien esponjadas. Si se quieren tener respecto de esto datos *prácticos* muy precisos, es necesario valerse del método de los cuadros y tomar directamente del suelo muestras de tierra, apelmazadas después de su cultivo, y de tierra removida por los instrumentos de labranza: porque los experimentos de laboratorio dan cifras que á menudo se apartan mucho de la realidad, ya que la división de la tierra es incomparablemente mayor cuando se opera con una pequeña cantidad de materia que cuando se opera con las tierras en el campo, aun cuando hayan sido muy bien trabajadas con los instrumentos de cultivo. Dehérain ha estudiado el movimiento del agua en una tierra convenientemente esponjada y en la misma tierra fuertemente comprimida; las muestras estaban contenidas en campanas de cobre, taladradas en el fondo, de igual diámetro y de igual altura, de 5 litros de cabida, que fueron expuestas al aire libre desde el mes de septiembre hasta el mes de diciembre. Estas campanas tenían orificios laterales que permitían, por medio de una sonda, tomar muestras de ensayo en el momento oportuno, á fin de poder conocer la proporción de humedad de las diferentes capas. El agua penetra fácilmente en la tierra muelle; poco tiempo después de principiar el experimento, la repartición del líquido es sensiblemente homogénea en todas las alturas

En la tierra apretada, la infiltración es difícil y sólo al cabo de dos meses la proporción de humedad de la capa inferior llega y sobrepuja á la de la capa superficial. El experimento se dió por terminado cuando el agua principiaba á salir por la abertura inferior de las campanas: además, la tierra esponjada, por efecto de la caída de agua de lluvia, se había apelmazado y las comparaciones ya carecían de valor.

En un estudio anterior (pág. 124) hemos examinado cuáles son los efectos del apelmazamiento de la tierra en la ascensión, á través de ella, de una capa de agua situada más baja. El agua sube con tanta más rapidez cuanto más apretada está la tierra, por efecto de la mayor finura de los tubos capilares. En una tierra cuya superficie ha sido bien esponjada por labor ó la escarda, el agua de las capas inferiores llega á veces con dificultad á esta superficie. Esto constituye un serio inconveniente cuando, á causa de una sequedad prolongada, la capa superior del suelo pierde poco á poco aquélla por evaporación. Por esto es indispensable, mediante un *rodillo,* ó por apisonamiento, si se trata de una corta extensión de terreno, aproximar unas á otras las partículas térreas, volviéndolas á soldar en cierto modo, á fin de hacer llegar á la superficie el agua de las capas profundas. Por efecto de este apelmazamiento artificial, las semillas que están á poca distancia de esta superficie, pueden beneficiar de una cantidad de agua capaz de hacerlas germinar; mientras que si se abandona el suelo esponjado en este estado, la germinación será incompleta ó muy lenta.

Recíprocamente, cuando las plantas han adquirido cierto desarrollo, gracias á la llegada de esta humedad, que ha determinado la apretadura artificial, si la sequedad persiste es indispensable impedir que se pierda aquí por evaporación. Para ello, se efectúa una operación inversa de la precedente destinada á destruir la continuidad del suelo y á formar grandes espacios vacíos, á través de los cuales el agua no podrá circular más que con lentitud. Así se economizará la humedad de las capas profundas. La operación destinada á destruir la continuidad de la superficie del suelo, se llama *bina* ó *escarda*. No solamente obra en el sentido que acabamos de definir, sino que además tiene otro objeto. Cuando las plantas han sido sembradas en filas bastante distanciadas, la bina destruye las malas hierbas, cuya vegetación, á lo menos la de algunas de ellas, es bastante rápida para comprometer con su desarrollo el cultivo de la planta principal (remolachas, patatas). Además, las plantas adventicias quitan al suelo cierta proporción de agua, de la cual quedan así privados los vegetales de cuyo cultivo se trata.

Cuando la tierra ha sido esponjada, y después abandonada á sí misma durante cierto tiempo, la caída de la lluvia, sobre todo si ésta es abundante, estrecha poco á poco los espacios libres que se habían formado al esponjar la tierra. Aun suponiendo que la proporción de



carbonato cálcico, que disuelve esta agua de lluvia sea poco considerable y que quede en el suelo bastante calcáreo para asegurar la coagulación de la arcilla, y por consiguente el mantenimiento de la tierra en el estado de agrupación de partículas, no es menos cierto que la caída del agua actúa mecánicamente, como ya hemos dicho antes (pág. 169), llevando á los espacios libres del suelo muelle partículas arenosas que disminuyen paulatinamente su capacidad. Esta destrucción de la mullidura es aún más acentuada en los suelos pobres en calcáreo; entonces la arcilla entra en suspensión y contribuye á obstruir los canales que antes atravesaba el agua con facilidad. Este efecto mecánico y químico del agua de lluvia, se encuentra igualmente en la tierra cultivada. Por lo tanto, toda tierra, previamente mullida, y después cultivada ó no, pero que sufre la acción de las lluvias durante cierto tiempo, se apelmaza; resulta de ello que su capacidad para el agua, conseguida en los trabajos mecánicos de las labores, disminuye en grandes proporciones. Así, cuando el suelo es pendiente, el agua deja de penetrar en su interior; resbala en su superficie y queda perdida para la tierra considerada. Esta destrucción de la mullidura es aún más marcada en los suelos arcillosos; en su superficie permanecen capas de agua largo tiempo, sobre todo si estos suelos son poco calcáreos.

Resulta de lo que se acaba de decir, que cuando los buenos efectos de la bina, desde el punto de vista de la ruptura de la continuidad del suelo, desaparecen por efecto del apelmazamiento producido por una lluvia, es necesario volver á empezar una operación análoga á fin de impedir de nuevo la evaporación continua del suelo.

Es, pues, indispensable, esponjar el suelo, á lo menos una vez al año, cuando las plantas que en él quieren cultivarse exigen muchos meses antes de llegar á la madurez; y, como regla general, cada vez que el suelo deba recibir, ya sean semillas, ya vegetales trasplantados. De esta manera se ponen á disposición de las plantas numerosos espacios donde se alojarán las aguas meteóricas ó las aguas de riego; además, las raíces penetran tanto mejor en el suelo cuanto más poroso es éste; así, los bancales de un huerto bien cuidado deben ser esponjados varias veces cada año. Cuando la lluvia ó los riegos artificiales han apelmazado la tierra entre las plantas de un huerto, se acostumbra practicar una bina que, destruyendo el apelmazamiento, forma nuevos espacios libres. Se puede también romper la continuidad del suelo é impedir la evaporación del agua poniendo encima de la tierra una capa de estiércol muy descompuesto ó paja. Esta práctica da muy buenos resultados para la conservación de la humedad. Es muy empleada en los cuadros de flores. Entonces no pueden destruirse las malas hierbas por medio de la bina; se quitan las plantas adventicias á mano.

Completaremos estos datos relativos al trabajo del suelo exponiendo sumariamente la práctica del barbecho. Esta cues-

tión está íntimamente relacionada con la que acabamos de tratar.

Barbecho.—En la antigua agricultura, y aun actualmente en algunas comarcas, cuando una tierra había producido cereales durante dos años consecutivos, se labraba el suelo y se le dejaba abandonado á sí mismo durante el tercer año. Después de haberlo abonado, se procedía á la siembra en otoño (por ejemplo, trigo). Si, á causa de esta manera de proceder, se perdía de este modo una cosecha, se podían, sin embargo, sacar de esta práctica algunas ventajas, las principales de las cuales resumiremos rápidamente siguiendo lo que ha dicho sobre este tema Dehérain en su *Tratado de química agrícola*.

En primer lugar, el barbecho permite *un buen trabajo del suelo;* porque, cuando los cultivos siguen inmediatamente uno tras otro, no se puede escoger el momento propicio para dar una labor cuidadosa. En efecto, un suelo no puede ser trabajado en cualquier época. Supongamos que sea muy arcilloso y que haya recibido una gran cantidad de agua: el arado lo dividirá en terrones voluminosos que podrán permanecer mucho tiempo en esta forma. En un suelo en barbecho se dan las labores en la época del año que se cree conveniente, y se repite la operación si es necesario.

En segundo lugar, el barbecho permite *limpiar* el suelo. Cuando siguen cereales á cereales, la tierra se cubre paulatinamente de malas hierbas que son imposibles de quitar. Las labores del año de barbecho están precisamente destinadas á destruir las plantas parásitas que á menudo disputan su alimento al cultivo principal hasta tal punto, que, al cabo de algunos años, el rendimiento de éste disminuye en enormes proporciones. Actualmente, la introducción en la alternativa de cosechas de cultivos en que se aplica la escarda proporciona el medio de evitar el barbecho.

Cuando se toman muestras de tierra á diferentes profundidades en suelos plantados ó no, se encuentra siempre que el aprovisionamiento de agua es mucho mayor en los segundos que en los primeros. Donde faltan los vegetales, entra sólo en juego la evaporación del suelo para quitar á la tierra una parte de su humedad. Las plantas, como se sabe, evaporan una considerable cantidad de líquido y desecan la tierra hasta una gran profundidad. El barbecho presenta, pues, la ventaja de almacenar cantidades importantes de agua de reserva que aprovechará más tarde á la vegetación.

El trabajo del suelo favorece también la nitrificación. Una tierra en barbecho pierde, por infiltración, infinitamente más nitratos que una tierra cultivada (véase capítulo XII).

Las labores cuidadosas que se dan al suelo diseminan los fermentos nitrificadores, facilitan la introducción del aire y la penetración del agua: condiciones éstas que aceleran la oxidación del nitrógeno orgánico (véase capítulo XI, *Nitrificación*). Un suelo plantado pierde, por infiltración, mucho menos nitrógeno nítrico á causa

del aprovechamiento de este nitrógeno por la planta. Además, por efecto del mayor estado de sequedad de un suelo cultivado, la nitrificación es notablemente retardada; de donde menor pérdida de nitratos en el suelo cultivado. Pero, en una época en que los estiércoles escaseaban y los abonos químicos eran desconocidos, había interés en favorecer, mediante repetidas labores, esta nitrificación, cuyo origen entonces se desconocía. Quedaban en el suelo, á pesar de las lluvias, bastantes nitratos para subvenir á las necesidades de las futuras cosechas.

Hoy conocemos el mecanismo en virtud del cual el suelo en barbecho se enriquece en nitrógeno orgánico: la asociación simbiótica de ciertas algas con ciertas bacterias, así como el trabajo de los *Azobacter*, fijan en un suelo, no cultivado y no abonado, cantidades de nitrógeno atmosférico que no son despreciables.

El barbecho casi ha desaparecido donde se pueden adquirir los abonos necesarios y donde una alternativa acertada de cosechas permite limpiar el suelo. De todos modos, no deja de ser cierto que esta práctica, puramente empírica, presentaba reales ventajas.

Acabamos de estudiar las propiedades físicas de los suelos y de definir las relaciones de la tierra de labor con el agua, el aire y el calor solar. Ya que cada elemento de la tierra de labor posee una característica especial, hemos de buscar por qué procedimientos se puede aislar cada elemento y determinar su peso. Este modo especial de análisis constituye el objeto del siguiente capítulo.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS FÍSICO Y MECÁNICO DE LOS SUELOS

Objeto del análisis físico y mecánico de los suelos; procedimientos generales.—Toma de una muestra de tierra.—Procedimiento de análisis físico de Schlœsing.—Análisis mecánico.—Procedimientos de sedimentación.—Procedimientos de arrastre.—Utilidad del análisis físico y mecánico de los suelos.—Análisis mineralógico.

Objeto del análisis físico de los suelos.—PROCEDIMIENTOS GENERALES.—Las nociones que hemos adquirido, estudiando la contextura de los suelos por una parte, y sus propiedades físicas por otra, nos han enseñado la importancia de los cuatro elementos fundamentales que constituyen la tierra de labor. Busquemos, pues, un medio para determinar, con tanta precisión como sea posible, el peso de estos elementos contenidos en una masa determinada de tierra. Sin embargo, esta sola determinación ponderal no nos suministraría más que datos incompletos si dejásemos á un lado la cuestión de la *dimensión de los elementos*. La mayor parte de la masa de la tierra de labor está formada sobre todo de arena, dando á esta palabra el sentido que le hemos concedido anteriormente. Parece, pues, indispensable tratar de clasificar *por orden de tamaños* los diversos elementos arenosos, porque del predominio de tal ó cual tamaño de la arena dependerá *a priori* la permeabilidad ó la impermeabilidad de una tierra determinada. Desde el punto de vista del estudio completo de las propiedades físicas y de su interpretación, esta clasificación de los elementos presta los mayores servicios.

Veremos á continuación que su importancia no es menor en cuanto se refiere á las propiedades químicas del suelo y al valor de las materias minerales que la planta debe encontrar en él. El análisis físico y mecánico de los suelos tiene por objeto efectuar las operaciones cuyo carácter acabamos de definir.

Este vasto tema exigiría extensas explicaciones. Pero no tenemos la intención, en este pequeño libro, de hablar de los numerosos problemas analíticos que suscita el conocimiento á fondo de la tierra de labor; nos faltaría espacio para ello. De todos modos, estas cuestiones de análisis físico y mecánico de los suelos están tan íntimamente relacionadas con el estudio de su constitución y de sus propiedades, que nos vemos obligados á abocetar aquí algunos de los modos operatorios á que generalmente se recurre para proceder á las determinaciones relativas á la clasificación cuantitativa de los elementos. Nos limitaremos, por lo que toca al análisis físico, á exponer el procedimiento de Schlœsing cuyas ventajas prácticas son indiscutibles por la rapidez de la ejecución y el valor de los datos que este procedimiento es capaz de dar, sean las que fueren las críticas de que ha sido objeto. En cuanto á los procedimientos empleados en el análisis mecánico, se pueden, desde un punto de vista general, clasificar en dos grupos: 1.º, procedimientos en los cuales la tierra, sometida á ciertas manipulaciones preliminares que indicaremos, es puesta en suspensión en el seno de una masa de agua en la que, después de agitación, los granos de arena caen con velocidades variables según su tamaño y sedimentan en capas superpuestas por orden de tamaño decreciente; 2.º, procedimientos en los cuales puesto un peso conocido de tierra en una alargadera de sección y altura determinadas, una corriente de agua de velocidad conocida entra por la parte inferior de la alargadera y arrastra unos elementos y no otros. Es evidente que, según la velocidad de la corriente líquida y la altura de la alargadera, los elementos arenosos de cierta dimensión serán llevados y arrastrados fuera de ella. Se les podrá recoger y pesar; y aun se podrá también obligarlos á atravesar una segunda y aun se una tercera alargadera, donde los elementos más gruesos se

posarán, mientras que los más finos serán finalmente expulsados con el agua que saldrá de las alargaderas. Este procedimiento por *levantamiento* clasifica bastante bien los elementos; es de fácil ejecución porque el aparato, una vez dispuesto y regulado, funciona automáticamente; pero es algo convencional. Es necesario insistir en que, para que un procedimiento sea bueno ó á lo menos utilizable, es preciso que dos análisis consecutivos den á poca diferencia el mismo resultado. Pues bien, entre los muchos métodos ideados, algunos son defectuosos en este concepto. Por esto no indicaremos más que un corto número que responden satisfactoriamente al fin propuesto.

Dimensiones relativas de los elementos. — Cuando se examina, aun superficialmente, la mayoría de las tierras de labor, se observa que su masa está sembrada de piedras más ó menos voluminosas; es necesario hacer una *clasificación convencional* de estas masas sólidas, haciéndolas pasar por cedazos y tamices cuyas mallas ú orificios tengan una dimensión conocida. En realidad, entre los fragmentos de rocas que pueden pesar muchos centenares de gramos y los granos más finos de arcilla cuyo diámetro es menor de una milésima de milímetro, se encuentran todos los términos medios posibles. Si todos estos elementos fuesen esféricos, es evidente que se les podría obligar á pasar por diferentes tamices cuyas mallas tendrían el diámetro de las esferas; pero la mayor parte de los elementos del suelo tienen una forma irregular, á menudo alargada: de manera que un elemento que supondremos prismático, cuyo lado menor tenga 1 milímetro, por ejemplo, y cuya longitud sea de 3 milímetros, atravesará un tamiz de 1 milímetro cuando se presenta en sentido de su longitud, pero quedará sobre el tamiz si se presenta transversalmente. Por repetidas sacudidas se podrá obligar á este elemento á pasar por el tamiz; pero, si se encuentra mezclado con otros elementos poco más ó menos esféricos, de 1 milímetro de diámetro, es evidente que la masa tamizada será poco homogénea. No se puede, pues, en resumen, á pesar de todo el cuidado que se tenga, obtener más que partes de una homogeneidad muy relativa.

I

TOMA DE UNA MUESTRA DE TIERRA

La toma de muestras tiene capital importancia. He aquí de qué manera conviene proceder (1). Una muestra que se somete al análisis, debe representar (en cuanto sea posible) la composición media de un terreno. Para juzgar la homogeneidad de éste, se pueden examinar las cosechas que da. Si las plantas tienen la misma altura, un color verde uniforme en la época en que la vegetación es más activa, es probable que el terreno de que se trata sea homogéneo en su formación. Si la toma de la muestra no puede efectuarse más que en un momento en que no hay vegetación, se podrá consultar el *color* del terreno y ver si este color es el mismo en todas partes. Será bueno también tomar en muchos puntos puñados de tierra y, si es húmeda, se apreciará á mano, con un poco de hábito, su grado de plasticidad, que deberá ser el mismo en todos los sitios. Si el terreno no parece homogéneo, se le dividirá en porciones, cuyo aspecto general, ya sea de la tierra, ya sea de los cultivos, parezca poco más ó menos uniforme.

Después de haber quitado de la superficie del suelo las plantas y los restos vegetales aparentes, se abre con la laya un hoyo prismático de unos 50 centímetros de lado, cuya profundidad variará con el espesor del suelo. Hemos definido ya qué debe entenderse por *suelo* y por *subsuelo*. En la mayoría de los casos es fácil distinguir uno de otro. En efecto, cuando se examina el corte vertical de un terreno, se observa que, en una altura que varía con las tierras, el color es poco más ó menos homogéneo y á menudo muy

(1) Es útil consultar sobre este asunto la descripcion de los métodos adoptados por el *Comité consultivo de las estaciones agronómicas y de los laboratorios agrícolas* (1891). Lo que aquí exponemos es un resumen de ello, añadiendo algunas observaciones personales.

obscuro. Luego, bruscamente ó de una manera no tan precisa, aparece una capa térrea menos obscura que la que hay encima y que, en gran número de casos, corresponde á una formación geológica distinta. La capa superior se llama *suelo*, la subyacente *subsuelo*. Con bastante frecuencia — y esto es mala condición — el suelo descansa sobre una roca dura, impenetrable ó poco menos para las raíces y los instrumentos de labranza. El espesor de la capa del suelo, propiamente dicho, varía entre algunos centímetros y muchos decímetros; cuanto más espesor tiene, por regla general, mejor es la calidad del suelo. Éste, cuando es suficientemente profundo, es el único que recibe las labores y los abonos; pero, si su profundidad es escasa, la capa superior del subsuelo es también afectada por el arado ó enriquecida por los abonos. Además, aun admitiendo que la capa del suelo sea bastante profunda (30 á 40 centímetros), muchas raíces penetrantes pasan de esta profundidad y van á parar al subsuelo, del cual toman elementos nutritivos. Desde el punto de vista físico, las cualidades del subsuelo, según veremos más adelante, repercuten especialmente en las cualidades del suelo. Resulta de esto que es indispensable unir al análisis mecánico y físico de la tierra del suelo, las mismas determinaciones hechas en la tierra del subsuelo; el hoyo abierto en la tierra de que se toman muestras, deberá llegar á una profundidad tanto mayor cuanto más hondo sea el subsuelo.

Terminada la cavidad prismática de que hemos hablado antes, se corta con la laya, es el borde del hoyo, un prisma recto que se hace desprender mediante un golpe horizontal en el punto donde principia el subsuelo, es decir, donde cambia el color del suelo. Se opera del mismo modo en muchos puntos del campo. Todas estas muestras de tierra se mezclan bien; se quitan á mano las piedras voluminosas y se anota su peso, comparándolo con el de la tierra total tomada. Se hace lo mismo con la tierra del subsuelo, tomando ésta de los mismos sitios que la del suelo; en general, convendrá cortar un prisma más alto en la tierra del subsuelo (hasta 1 metro y más). En efecto, las raíces de las leguminosas y las de los grandes árboles, penetran muy adentro.

Después de haber hecho muy homogénea la muestra total (suelo y subsuelo, por separado), mezclándola con la laya en una era llana ó en una carretilla algo grande, se procede á su desecación al aire libre, operando con 2 ó 3 kilogramos de materia.

Se pueden presentar dos casos principales: la tierra es muelle, es decir, que puede desmoronarse fácilmente con la presión de los dedos cuando está seca; ó bien la tierra es arcillosa y compacta y, al desecarla, adquiere tal consistencia que no puede ser desmoronada.

En el caso de las tierras muelles, la división se hace á mano. El frote de los dedos con las partículas, más ó menos aglomeradas cuando son secas, basta para pulverizarlas ó para desprender los elementos finos de los guijarros á que están adheridos. En el caso de las tierras compactas, el frote de los dedos no basta para destruir la cohesión de las masas, á menudo voluminosas, formadas sobre todo por arcilla. Es preciso entonces, ya aplastar la tierra con un mazo de madera sin romper ciertamente los elementos rocosos, ya hacer pasar muchas veces por encima de la tierra un rodillo de madera, sobre el cual no conviene ejercer una presión demasiado fuerte.

Si estos últimos medios fuesen insuficientes, y si la tierra, muy arcillosa, permaneciese en forma de granos grandes, se deslíe esta tierra en agua después de haberla humedecido previamente. Se obtiene entonces, malaxándola á mano, una papilla flúida (1 kilogramo, por ejemplo) que se vierte en un tamiz (luego diremos qué dimensiones deben tener las mallas de éste). Por medio de un chorrito de agua de fuente y malaxando las partículas mayores, se harán pasar fácilmente las partes finas á través del tamiz. Cuando estas partes finas, inmergidas en un exceso de agua, se han reunido en un barreño puesto debajo del tamiz, se decanta el líquido una vez se haya clarificado, al cabo de veinticuatro horas, y se vierte en una cápsula la materia semiflúida que se deseca en bañomaría. La pasta obtenida se hace homogénea malaxándola á mano: esta última operación es muy importante. La tierra sometida á este tratamiento debe ser previamente

pesada, en su estado inicial y con su actual grado de humedad, con la aproximación de un gramo. Por desecación en la estufa á 110° de una muestra análoga, se determinará la cantidad de agua que esta tierra contiene. Los guijarros y cascajo, que quedarán en el tamiz, se desecan y pesan.

El procedimiento de desleír la tierra, que acabamos de citar, según Schlœsing debería ser empleado en todos los casos. En efecto, es el único medio de obtener una muestra perfectamente homogénea; la tamización en seco nunca da resultados constantes. Esta homogeneidad de la materia tamizada, y luego desecada en baño maría, se obtiene, como hemos dicho, malaxando la tierra cuando ésta ya no se adhiere á los dedos. Se conserva la tierra así preparada en frascos bien tapados, á fin de preservarla de la desecación.

Conviene, en la práctica del análisis físico, hacer pasar las tierras secas á través de un tamiz de tela de latón de diez hilos por centímetro. La distancia entre cada dos hilos es, por consiguiente, algo inferior á un milímetro. La muestra de tierra que se tamiza se divide, pues, en dos partes: la *tierra fina* que pasa, y á la cual se aplican las operaciones de los análisis físicos y químicos, los *guijarros* y *cascajo* que quedan sobre el tamiz y cuya naturaleza mineralógica se debe examinar. Porque si, por convenio, se admite que estas piedras y arenas no tienen más que un papel alimenticio muy restringido, no hay que perder de vista que muchas de ellas, con el tiempo, se reducirán á pequeños fragmentos que entrarán, por consiguiente, en la parte llamada *tierra fina* ó, á causa de sus menores dimensiones, serán fácilmente atacadas por los disolventes naturales. Además, desempeñan un papel importante desde el punto de vista físico, porque el agua y el aire circulan fácilmente en su superficie.

Cuando estos elementos gruesos habrán sido separados, como se ha dicho, de los elementos finos, se pesarán y se comparará su peso con el de la tierra fina. Será bueno verter ácido clorhídrico diluído sobre las piedras y las arenas gruesas para averiguar la presencia ó la ausencia del calcáreo. Á veces se llaman *guijarros* ó *piedras* los elementos que no pasan á través de las mallas de 5 milímetros, y *cascajo* ó

arena gruesa los que quedan sobre el tamiz de mallas de 1 milímetro. (Véase más adelante, pág. 209.)

Otros procedimientos para tomar muestras del suelo. —Á menudo se toman muestras de tierra con una barrena de acero, de 5 centímetros de diámetro interior, que se introduce en diferentes puntos del suelo hasta cierta profundidad, determinada por un ensayo anterior consistente en examinar en una zanja el espesor de la capa de tierra de labor ó suelo propiamente dicho. Estos *cilindros* de tierra son mezclados continuamente. Se procede luego á la desecación de la tierra y á su tamizado como antes (1).

II

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS FÍSICO DE SCHLŒSING

Lo que hemos llamado *tierra fina* es una mezcla en la cual pueden existir los cuatro elementos: arena, arcilla, calcáreo, humus. Estos cuatro elementos no existen siempre en una tierra, según hemos dicho anteriormente. Puede faltar la arcilla; del mismo modo, en tal ó cual tierra, faltarán el calcáreo ó el humus. El procedimiento que vamos á describir conduce á una determinación rápida y satisfactoria de la proporción de los elementos citados; pero no clasifica la arena más que en dos categorías y de una manera algo arbitraria.

Se toman 10 gramos de tierra fina (cuyo grado de humedad se conoce ó que se ha desecado á 110°) y se ponen en una cápsula de porcelana de unos 10 centímetros de diámetro. Sobre esta muestra se vierten unos quince centímetros cúbicos de *agua destilada*, y se deslíe la tierra frotándola con el índice, de manera que penetre bien el agua en toda la masa. Se obtiene así un líquido turbio, porque, en el caso en que

(1) Para la toma de muestras de tierra, tanto del suelo como del subsuelo, resulta muy práctico el empleo de la *barrena americana* que, mediante piezas adicionales, permite sacar fácilmente muestras hasta la profundidad de dos ó tres metros. Puede leerse su descripción en la obra *Anleitung zur wissenschaftlichen Bodenuntersuchung* de Wahnschaffe y Schucht (3.ª ed., Berlín, 1914), pág. 19.—C. B.

haya arcilla, ésta se pone en suspensión gracias al empleo del agua destilada. Además, los elementos arenosos muy tenues, aun cuando no vayan acompañados de arcilla, pueden permanecer largo tiempo en suspensión en el agua. Se cuentan 10 *segundos* á partir del momento en que se ha dejado de agitar, y luego se decanta suavemente el líquido turbio á un vaso de precipitados. Se repite esta operación hasta que el agua destilada queda límpida pasados los diez segundos de espera. Queda en la cápsula lo que se ha convenido en llamar *arena gruesa*. Se seca ésta á 110° y se pesa. Es indispensable humedecerla con ácido clorhídrico y observar si hay efervescencia, señal de la presencia del calcáreo en granos relativamente grandes. La determinación cuantitativa de este calcáreo podrá efectuarse por los métodos químicos ordinarios. Observemos, además, que cierta cantidad de materia orgánica adhiere todavía á las partículas de arena gruesa. Su determinación exacta debería efectuarse por combustión mediante el óxido de cobre. Pero puede prescindirse de esta operación en el presente caso; pues, en realidad, tiene más bien un interés teórico que práctico. De todas maneras, se puede tener una idea aproximada del peso de esta materia orgánica incinerando la arena gruesa, desposeída primero del calcáreo, lavada y desecada á 110°.

El vaso de precipitados contiene toda el agua de decantación (200 á 300 centigramos aproximadamente). En él se encuentran *arena fina*, esto es, fragmentos de cuarzo, de diversos silicatos, *calcáreo* en granos muy menudos, *arcilla*, que queda en suspensión, y *materia orgánica*. Esta última estaba parcialmente en estado de libertad en la muestra primitiva; otra parte, adherida á los granos de arena, ha sido desprendida de ellos por el frote con el índice. Se añade al líquido turbio ácido nítrico hasta que cese la efervescencia y se deja en reposo. Poco á poco el líquido se aclara á causa de la coagulación de la arcilla por el ácido ó por efecto de la presencia del nitrato cálcico, si hay calcáreo en la muestra analizada. Al cabo de cierto tiempo, se decanta en un filtro y luego se hace pasar á éste, con ayuda del chorro del frasco lavador, la parte sólida que queda en el fondo del vaso. Se

lava con agua destilada de modo que se separe completamente el nitrato cálcico. Por otra parte, se conoce que ha terminado la loción en que el líquido que filtra, al principio muy limpio, poco á poco se vuelve turbio cuando, habiendo desaparecido toda la acidez y no quedando ya nada de sal cálcica, la arcilla entra en suspensión. En el líquido filtrado se determina la cal por los métodos ordinarios.

Sobre el fieltro quedan la arena fina, la arcilla y el humus. Se agujerea este filtro con un agitador y se hace caer su contenido, con el chorro del frasco lavador, á un vaso de vidrio. El líquido es turbio; se favorece la suspensión de la arcilla agitando el vaso y vertiendo en él un poco de amoníaco que disuelve la materia húmica. Se deja en reposo durante veinticuatro horas: la arena fina se posa. De todos modos, esto no es más que convencional, por exigirlo así las necesidades del análisis. En efecto, la arena fina, retenida en la red de la arcilla coloide, exigiría para depositarse completamente un tiempo infinitamente más largo. Al cabo de veinticuatro horas se decanta el líquido turbio con un sifón, se vierten en el residuo algunos centímetros cúbicos de amoníaco y 1 litro de agua destilada, y se repite la decantación al día siguiente. Es bueno, en el caso de una tierra muy arcillosa, repetir aún esta operación dos ó tres veces. La arena fina sedimentada es recogida en una cápsula, desecada á 110° y pesada.

Los líquidos turbios de decantación son luego reunidos: contienen arcilla coloide y materia húmica disuelta en el amoníaco. Se coagula la arcilla por adición, no de un ácido que precipitaría el ácido húmico á causa de su separación del amoníaco, sino de una solución diluída de sal amoníaco ó de cloruro potásico que determina la formación de copos de arcilla. Una vez sedimentados éstos, se recogen en un filtro y se lavan. Se dobla el filtro repetidas veces sobre sí mismo, después de haberlo puesto encima de una lámina de vidrio, á fin de reunir la arcilla en un pequeño volumen. Se pone luego el filtro con su contenido en una cápsula tarada, se deseca, calcina y pesa; al hacer el cálculo se tienen en cuenta el peso de las cenizas del filtro. Finalmente, se coagula el ácido húmico por adición de un ácido (nítrico ó clorhídrico) y se recogen

los copos de materia negra en un filtro tarado que se deseca á 110°.

El análisis físico, tal como acabamos de efectuarlo, permite, pues, apreciar, en la tierra fina, la arena gruesa, la arena fina, el calcáreo fino, la arcilla y el humus. Presta grandes servicios cuando se hace con cuidado; pero importa *interpretar* las cifras que proporciona. Trataremos de esta interpretación cuando habremos hablado del análisis químico de la tierra de labor. Este último, en efecto, *debe hacerse siempre después del análisis físico:* solamente combinando los datos que dan estos dos análisis se puede formar una idea exacta de las cualidades agrícolas de un suelo determinado.

Hay que hacer aquí una observación destinada á completar las nociones que preceden. Las partículas de arena extraídas del suelo por simple levigación están, generalmente, recubiertas de una capa humoarcillosa. Dumont (1910) ha demostrado que, si se quieren obtener resultados correctos, conviene destruir estas capas limpiando los granos de arena mediante una solución de ácido oxálico. El autor separa las materias que forman el limo y la arcilla por centrifugación: este método es mixto y corresponde á la vez al análisis físico y al análisis mecánico; nos contentamos simplemente con mencionarlo.

III

ANÁLISIS MECÁNICO

Nociones preliminares de este modo de análisis.— El análisis físico, tal como acabamos de exponerlo, sólo clasifica los elementos arenosos en dos categorías: *arena gruesa*, cuyos granos tienen un diámetro comprendido entre 0,9 milímetros y 0,1 milímetros aproximadamente, y *arena fina* de elementos inferiores á 0,1 milímetros, cuya proporción exacta no puede determinarse, como hemos dicho, más que de un modo relativo, porque un reposo de veinticuatro horas no basta para quitar á la arcilla coloide en suspensión todos los elementos arenosos extremadamente tenues que retiene con grande energía.

El objeto que se propone obtener en el *análisis mecánico* es conseguir datos más precisos sobre las dimensiones de los granos de arena, y clasificarlos en cierto número de grupos de diámetros, si no idénticos, lo que sería imposible, por lo menos aproximados. Es indispensable hacer notar en seguida que el análisis mecánico es una operación muy delicada si se trata de obtener, en dos ensayos hechos con una misma tierra, cifras comparables entre sí. Además, hay aquí lamentables confusiones, porque la dimensión de las mallas de los tamices que se emplean varía con los experimentadores; por otra parte, un tamiz nunca es absolutamente perfecto en la homogeneidad de sus mallas. El empleo de la criba de agujeros circulares, de diámetro exactamente conocido, será preferible al de los tamices de mallas cuadradas. Los términos empleados para designar las partículas de tal ó cual dimensión difieren según los autores. Las voces *arena gruesa, arena fina, limo, cascajo grueso, cascajo fino*, etc., no tienen valor alguno si no está definida de una manera precisa la dimensión de los granos de la materia que forma cada uno de estos grupos, ya sea por el diámetro de cada grano, ya por la velocidad de caída en el seno de una columna líquida de altura determinada.

Los procedimientos propuestos para efectuar el *análisis mecánico de los suelos* son extremadamente numerosos; unos son de ejecución simple y relativamente rápida, otros son más complicados y requieren material especial. Los agrónomos americanos, en estos últimos años, han perfeccionado mucho los procedimientos de análisis mecánico que, bien interpretados, conducirán verosímilmente á conclusiones muy interesantes respecto del valor agrícola de los suelos. Actualmente existen todavía divergencias á veces considerables entre las cifras obtenidas por tal ó cual método, divergencias que proceden de la dificultad extrema de separación de las partículas arenosas muy finas, las cuales permanecen en suspensión en el agua durante un tiempo incompatible con los informes prácticos que á menudo es preciso dar en breve tiempo. Aun cuando todavía ahora esté luchando con numerosas dificultades, el análisis mecánico ofrece al estudio teórico de los suelos un vasto campo de investigaciones del mayor interés.

Es indispensable hacer notar que el solo empleo de tamices de diferentes tamaños, aun bien calibrados, á través de los cuales se haría pasar sucesivamente una muestra dada de tierra seca, no conduciría más que á malos resultados; porque, como hemos dicho antes,

cada grano de arena está revestido de una capa que está fuertemente adherida al mismo y que, ni por la acción de los ácidos, ni por la de los álcalis, puede desprenderse completamente. Únicamente en el seno de un líquido, *sin acción química sobre la tierra*, es capaz de deshacerse poco á poco este conjunto.

Según hemos dicho al principio de este capítulo, el análisis mecánico puede efectuarse de dos maneras: 1.º *Por sedimentación*. Se deja caer en el interior de cierta masa de agua un peso conocido de tierra fina definida como antes: los elementos más gruesos son los primeros en caer, los elementos más finos caen sucesivamente. Si, por medio de una disposición cualquiera, se recogen al cabo de tiempos determinados las porciones que se han depositado ó las que quedan en suspensión, se podrá definir una tierra á partir de los respectivos pesos de sus elementos clasificados por orden de su tamaño. 2.º *Por arrastre*. Se levanta un peso de tierra conocido, contenido en una alargadera de diámetro conocido, mediante una corriente de agua que arrastra ciertos elementos ligeros y deja en el fondo de la alargadera los elementos más pesados. Daremos una idea de los principales métodos fundados en estos dos principios.

A. Procedimientos de sedimentación.—Principiemos por el estudio de algunos procedimientos de *sedimentación*.

Método de Schlœsing.—Conviene encabezar esta exposición del análisis mecánico por sedimentación, que forma la base de la manera de operar más correcta, con las siguientes observaciones publicadas por Schlœsing sobre este asunto (1903). El método indicado á continuación conduce siempre á resultados suficientemente comparables unos con otros respecto de una misma tierra.

Schlœsing hace notar que, si se quieren poner en estado de completa independencia todos los elementos de una tierra que están unidos entre sí por cementos minerales (arcilla) y orgánicos (humus), basta destruir el calcáreo por la acción del ácido nítrico diluído, seguida de un lavado con este mismo ácido al $1/1000$, y acabar por un tratamiento consistente en una digestión de algunas horas con agua ligeramente amoniacal.

Treinta gramos de tierra fina que han sufrido esta preparación

preliminar, se deslíen en dos litros de agua destilada contenidos en una campana de pie. La altura del líquido era de 36 centímetros en los ensayos del autor. Se hace la masa homogénea haciendo burbujear á su través una fuerte corriente de aire. El volumen del agua empleada es bastante grande para que cada grano sea independiente de todos los demás y se comporte, respecto del agua y de la gravedad, como si estuviese solo. Se admite, además, que estos granos caen verticalmente tanto menos aprisa cuanto más pequeños son, y que estas diversas velocidades son constantes. Al cabo de quince minutos de reposo, por ejemplo, se decanta el líquido de encima del sedimento por medio de un sifón ancho cuya rama larga está unida á un tubo de caucho, lo que permite cerrar el tubo mediante una pinza cuando no quedan en el vaso más que algunos centímetros cúbicos de líquido sobre el sedimento. Este se recoge, seca y pesa.

A fin de demostrar que la caída de cada grano es perfectamente libre en el seno del agua, Schlœsing trata de la misma manera un peso de tierra diez veces menor, ó sean 3 gramos, y compara el peso de los dos depósitos obtenidos al cabo del mismo tiempo. Se encuentra que estos dos pesos están en la misma relación que los pesos de las tierras empleadas. Un ensayo análogo, repetido con las tierras más diversas, da siempre la misma concordancia. Durante el tiempo de su caída, los elementos son, pues, independientes unos de otros; porque, si no existiese esta independencia, cuanto más densas fuesen las mezclas, más dificultosos serían los movimientos de los granos de arena; su caída sería, pues, retardada, y las mezclas más cargadas darían sedimentos de menor peso que las que lo fuesen menos. Schlœsing demuestra también la uniformidad de los movimientos de descenso dando alturas diferentes H_1, H_2, H_3 á los líquidos que contienen pesos conocidos de una misma tierra. En el caso de un descenso uniforme, se obtendrán depósitos cuyos pesos serán proporcionales á los de las tierras si se les deja, para formarse, tiempos proporcionales á las alturas H_1, H_2, H_3; y esto es exactamente lo que demuestra el siguiente experimento que permite deducir que los elementos del suelo tienen velocidades uniformes.

	Tierra muy arenosa			Tierra arci.		Tierra silíceoarci.		
Peso de las tierras, gramos	20	15	10	10	10	10	10	10
Altura de los líquidos, metros . . .	0,20	0,15	0,10	0,362	0,181	0,36	0,27	0,18
Tiempo de reposo en minutos	24	18	12	20	10	20	15	10
Peso de los depósitos, gramos . . .	11,794	11,066	7,359	6,822	6,821	6,720	6,764	6,780
Relaciones entre los pesos	20 : 14,96 : 9,95			10 : 10		10 : 10,07 : 10,00		

Schlœsing enuncia, pues, la proposición siguiente: se pueden clasificar en cierto número de grupos, en orden de su tamaño decreciente,

las arenas finas de una tierra vegetal, observando á la vez los tiempos que estas arenas emplean en recorrer en el seno del agua una altura determinada y los pesos de los sedimentos formados en los intervalos sucesivos de estos tiempos.

Por medio de una disposición extremadamente ingeniosa que funciona automáticamente, el autor ha podido aislar al cabo de un número de horas y de minutos determinado, cierto número de porciones de arenas de tamaño decreciente. Pero él se apresura á añadir que los resultados así obtenidos no pueden ser de una absoluta precisión. Las velocidades de caída dependen á la vez de la gravedad y de acciones retardatrices que sufren de parte del líquido ambiente. «*Teniendo todas las arenas del suelo, aproximadamente, la misma densidad, se puede decir que la acción de la gravedad es proporcional á sus volúmenes, mientras que la resistencia del agua depende sobre todo de sus superficies y de sus formas; y como, para un mismo volumen, las formas y las superficies son infinitamente variadas, ocurre que granos que deberían estar reunidos en razón de sus volúmenes, están en realidad repartidos en depósitos diferentes en razón de sus formas y de sus superficies. La clasificación por las velocidades de caída presenta, pues, imperfecciones que repercuten en los resultados del examen microscópico.*» Pero, si se multiplican las observaciones, se encuentran, para cada categoría, límites de dimensiones. Las siguientes cifras indican, en milésimas de milímetro, las dimensiones de algunos depósitos arenosos procedentes de diversas tierras:

90-70 ; 80-65 ; 50-70 ; 50-30 ; 35-20 ; 20-15 ; 15-5.

«*Por debajo de 5 milésimas de milímetro principia la serie de las arenas arcillosas, que conduce a las arenas invisibles y capaces de permanecer en suspensión indefinida en el agua pura, que constituyen la arcilla coloide*» (Comptes rendus, 1903, CXXXVII-369).

Las observaciones que preceden demuestran, pues, la posibilidad *relativa* de clasificación de los diversos elementos del suelo. Es imposible imaginar un método de separación absolutamente irreprochable por las razones que hemos expuesto anteriormente y sobre las cuales se ha extendido especialmente E. A. Mitscherlich.

Examinaremos brevemente los métodos siguientes:

Método de Hall.—Menos preciso que el precedente, este método consiste en tratar con ácido clorhídrico diluído un peso conocido de tierra (10 gramos). Se vierte en un filtro el residuo insoluble, se pesa después de desecación y se hace caer en una probeta de dimensiones determinadas que se llena de agua destilada. Se agita, se decanta al cabo de veinticuatro horas y se repite esta operación mientras el líquido sea turbio. Las aguas turbias, evaporadas, suministran la *arcilla*. El depósito arenoso que queda se somete á una serie de

tamizaciones y de suspensiones en el agua. El tiempo necesario para la obtención de un sedimento cuyos elementos tengan una dimensión determinada debe averiguarse por ensayos preliminares que consisten en medir, mediante el microscopio, el diámetro de los elementos en suspensión, hasta que se llega al tiempo necesario para obtener, en el sedimento, los elementos de una dimensión fijada.

Método de Wolf.—En este método, modificado por Knop, se destruye previamente el coloide arcilloso haciendo hervir un peso conocido de tierra (50 gramos) con agua destilada. Después de esto, la tierra se pasa sucesivamente por cribas de agujeros de 1, 0,5, y 0,25 milímetros. Cada una de las porciones recogidas se deseca y pesa. La última porción que ha pasado por la criba más fina (arena fina y partículas decantables) se pone en suspensión en agua destilada en una campana. Se agita la mezcla. Al cabo de tiempos de reposo determinados, se saca el líquido turbio con un sifón y se vuelve á empezar la operación hasta que el líquido salga completamente límpido. Se recoge el sedimento, se deseca y se pesa. En cuanto á las aguas turbias, se calientan en una cápsula hasta clarificación.

Waguer ha descrito un método análogo.

Método de Kühn.—El principio de este método es el siguiente: Un peso conocido de tierra (30 gramos) se pasa por el tamiz de 5 milímetros, luego se trata con agua hirviente. El magma enfriado se vierte en un tamiz de 2 milímetros y la materia que queda sobre este tamiz se divide, por medio de tamices de mallas apropiadas, en *cascajo grueso* y *cascajo fino*.

Los elementos que han pasado por el tamiz de 2 milímetros son introducidos en un cilindro de vidrio, de dimensiones determinadas, provisto en su parte inferior de una tubuladura que se cierra con un tapón de caucho. El tratamiento de la materia contenida en este cilindro se efectúa de una manera análoga á la del método de Wolf: se abre la tubuladura inferior para decantar el líquido en vez de emplear el sifón.

El *cilindro de Knop* no difiere del de Kühn más que por la presencia de cuatro tubuladuras laterales. Moore ha introducido algunas modificaciones de pormenores en las manipulaciones indicadas por Knop.

Osborne separa los elementos arenosos no empleando más que tamices de mallas de dimensiones bien definidas.

El lector deseoso de profundizar el estudio de los métodos de análisis mecánico de los suelos, de los cuales hemos expuesto aquí los rasgos esenciales, encontrará indicaciones preciosas sobre este tema en la excelente obra de Harvey W. Wiley: *Principles and Practice of agricultural analysis,* segunda edición, 1 volumen, Easton, 1906.

Denominación de los elementos arenosos.—He aquí, á título de información, los nombres de los elementos arenosos, así como sus correspondientes dimensiones, según algunos autores:

Según Wollny

Piedras y guijarros	Mayores de	10 milímetros.
Cascajo grueso.	Comprendidos entre	10 y 5
— medio	—	5 y 2
— fino	—	2 y 1
Arena gruesa	—	1 y 0,5
— media	—	0,5 y 0,25
— fina	—	0,25 y 0,10
Limo grosero	—	0,10 y 0,05
— medio.	—	0,05 y 0,025
— fino	—	0,025 y 0,005
Arcilla coloide	—	0,005 y 0,001

Según Kopecky

Cascajo ó guijarros	Mayores de	2 milímetros.
Arena gruesa	Comprendidos entre	1 y 2
— semifina.	—	1 y 0,5
— fina	—	0,5 y 0,3
— muy fina	—	0,3 y 0,1
Polvo arenoso	—	0,1 y 0,05
Polvo.	—	0,05 y 0,01
Polvo muy fino, menor de . .		0,01

Valores comparativos de los métodos antes descritos.—Se ha censurado el método de Schlœsing por hacer una separación de las arenas del todo insuficiente. Es evidente, como hemos dicho ya, que este método no clasifica las arenas más que en dos categorías algo arbitrarias. Pero, generalmente, esta simple determinación proporciona datos que bastan y que son susceptibles de una interpretación física racional. Además, este procedimiento es de ejecución rápida y no exige el empleo de aparatos complicados.

La ebullición preliminar de la muestra de tierra con agua, preconizada por muchos autores, es una manipulación que ha sido objeto de numerosas críticas. Lo primero que se le puede reprochar es ser un procedimiento mal definido de separación y de precipitación de la arcilla. Según la naturaleza de las tierras, esta ebullición deberá ser más ó menos prolon-

gada con arreglo á la aptitud variable que presentará la arcilla de adherirse á los granos arenosos. La precipitación de la arcilla por la ebullición con agua es debida al efecto del calor sobre esta materia, cuya naturaleza cambia forzosamente á causa de la elevación de temperatura que sufre; su grado de hidratación no es el mismo. Otro tanto debe decirse de la acción del calor sobre los hidratos de hierro y de alúmina y sobre los silicatos normalmente hidratados (zeolitas).

En segundo lugar, la precipitación de la arcilla por la ebullición con el agua es imputable á las substancias salinas contenidas en el suelo, substancias cuya cantidad debe probablemente aumentar por el hecho mismo de la acción más enérgica del agua hirviente: esto constituye también una causa de alteración bastante profunda de la estructura físico-química de la muestra sometida á semejante manipulación. Osborne, por estas razones, desecha el tratamiento con agua hirviente. La coagulación de la arcilla, la alteración de la estructura de los granos arenosos, el desgaste desigual manifestado por el aspecto granujiento que toma entonces la tierra hervida, la dificultad con que la arcilla recobra ulteriormente el estado en que puede permanecer largo tiempo en suspensión en el agua destilada sin posarse, justifican este modo de ver.

B. Procedimiento de arrastre.—Los principales métodos de arrastre de las partículas térreas por una corriente ascendiente de agua, son los siguientes: Para obtener con un mismo aparato resultados siempre comparables entre sí, conviene emplear una corriente de agua de velocidad constante. Pero, si estos métodos *per ascensum* presentan la ventaja de ser automáticos, en cambio no son capaces de efectuar una perfecta clasificación de los elementos más que en el caso, puramente teórico, de que las partículas del suelo sean todas esféricas y tengan el mismo peso específico. Á causa de las diferencias de peso específico, pequeñas en verdad cuando se trata de los elementos minerales, y de las variaciones de forma de estos elementos, la desigualdad de tamaño de las partículas recogidas para una velocidad

de agua determinada, constituye la regla general. De manera que, repitiendo en cada porción aislada un nuevo análisis, en las condiciones más parecidas que se pueda á las del primero, se obtiene otro resultado absoluto. No puede, pues, tratarse en este modo de clasificación, más que de *tamaños medios* de los elementos. Describiremos muy sumariamente algunos de estos procedimientos.

Procedimiento de Nobel. — Consiste esencialmente en hacer pasar una corriente de agua, á una presión determinada, por una serie de cuatro alargaderas cuyo volumen total es de cuatro litros y cuyos volúmenes respectivos están entre sí en la misma relación que los números 1, 8, 27, 64. La menor de las alargaderas comunica con el depósito que da al agua: en ella es donde se pone la muestra que se ha de analizar. Se concibe que los elementos de diverso tamaño se clasifiquen por orden de tamaños aproximadamente iguales bajo la influencia de la corriente de agua: los mayores quedarán en la primera alargadera (la de menor volumen); los demás, según su grado de finura, se depositan en las tres alargaderas siguientes ó, siendo llevados fuera de ellas, en un vaso situado después de la cuarta alargadera.

Muchos otros aparatos, que no difieren más que por la forma y el número de las alargaderas, están fundados en un principio análogo. Todos tienen los mismos inconvenientes: la clasificación de los elementos es arbitraria y, suponiendo el caso de una corriente de agua constante, una misma alargadera puede contener fragmentos cuyo tamaño varía en proporciones enormes, porque, aun cuando todos estos fragmentos heterogéneos tuviesen la misma densidad, no son levantados idénticamente por la corriente de agua.

Fig. 6.

Aparato de Schöne. — En el aparato de Schöne, la tierra es lavada por una corriente de agua de la misma velocidad en todos sus puntos, velocidad que se puede medir. He aquí una descripción muy sumaria de este aparato, que da bastante buenos resultados (figura 6). La alargadera de vidrio es cilíndrica en su parte superior, en una longitud de 10 centímetros con un diámetro de 5 centímetros. Esta parte cilíndrica se alarga inferiormente en un cono

estirado de una altura de 50 centímetros, y termina con un tubo de vidrio doblado en forma de semicircunferencia y luego vertical. Encima de la parte superior cilíndrica, hay un estrechamiento terminado por un cuello. Se cierra éste con un tapón de caucho, atravesado por un tubo de 3 milímetros de diámetro interior, encorvado dos veces en ángulo de 45°. En el punto K hay una abertura de 1,5 mm. de diámetro. Por esta abertura es por donde saldrá el agua, arrastrando consigo los elementos ligeros que se reciben en un vaso. La parte vertical del tubo KL tiene 1 metro de longitud; está dividida en centímetros. La materia que se somete al análisis mecánico se pone en el fondo de la alargadera; recibe la acción de un chorro de agua procedente de un depósito que comunica con el orificio G del tubo vertical. La velocidad de agua en la parte cilíndrica de la alargadera, donde se efectúa, en realidad, la levigación, está indicada por la altura á que se eleva el líquido en el tubo piezométrico KL. Para una velocidad determinada de la corriente, saldrán granos de cierto tamaño por el orificio K. Se hace una serie de experimentos preliminares para fijar el diámetro de los granos correspondientes á una presión determinada del líquido.

Aparato de Kopecky.—Este aparato, el último dado á conocer, es un aparato de Nobel modificado. Se compone de tres alargaderas (fig. 7), de diámetros muy desiguales: A (78 milímetros), B (56 milímetros), C (30 milímetros), unidas entre sí por tubos de vidrio provistos de enlaces de caucho. La corriente de agua llega por debajo de la alargadera más pequeña y, finalmente, se vierte en el gran vaso de precipitados; la velocidad de la corriente está indicada por el tubo piezométrico *p* que se encuentra en la parte superior de la alargadera A; esta velocidad se regula de manera que el gasto sea de 1 000 centímetros cúbicos en 202 segundos. En cada alargadera, la velocidad de la corriente es respectivamente: de 0,2 mm. por segundo en A; de 2 milímetros en B, de 7 milímetros en C. El diámetro de las partículas térreas retenidas por cada alargadera va decreciendo de

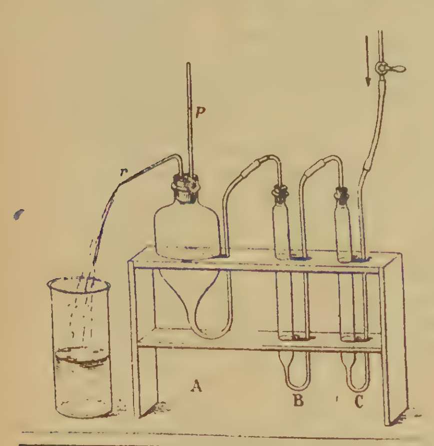


Fig. 7.

C hasta A; según Kopecky, se encontrarán en C partículas cuyo diámetro es mayor de 0,1 mm.; en B partículas cuyo diámetro está comprendido entre 0,05 mm. y 0,1 mm.; en A partículas cuyo diámetro está comprendido entre 0,01 mm. y 0,04 mm. Las partículas inferiores á 0,01 mm., son recogidas en el vaso de precipitados.

Se opera con 50 gramos de tierra seca al aire, que ha pasado por un tamiz de mallas de 2 milímetros. Esta tierra, adicionada de agua, se somete a la ebullición durante una ó dos horas. Se llena el aparato de agua, luego se destapa la alargadera C, que se vacia con un sifón. En esta alargadera se introduce la tierra con agua, después se hace pasar la corriente de agua de manera que el nivel de ésta en el tubo *p* quede en un trazo cuya situación está determinada por la velocidad antes indicada. Cuando el agua que se vierte en el vaso de precipitados es límpida, ha terminado la operación. Se recogen las porciones de arena recogidas en cada alargadera, se desecan y se pesan.

Este es el procedimiento de levigación que han empleado Müntz y Gaudechon en sus investigaciones sobre las cantidades de calor desprendidas en el contacto del agua con los diversos elementos del suelo. Los métodos de Schöne y de Kopeckey dan casi idénticos resultados.

Conclusiones.—No podemos extendernos más sobre los diversos procedimientos ideados para efectuar el análisis físico de las tierras. Ninguno de estos procedimientos es perfecto, por las razones que hemos señalado. Conviene hacer notar que muchos experimentadores, principalmente en América, emplean con éxito la fuerza centrífuga para acelerar la sedimentación de ciertas partículas finas. Esta práctica tiende á extenderse; ha dado ya resultados que animan á proseguirla.

Se puede asegurar que el análisis físico y mecánico ha prestado ya servicios cuya importancia no puede negarse, y que está llamado con el tiempo á ser para la agricultura una ayuda mucho más eficaz cuando los métodos actualmente usados habrán sido cuidadosamente estudiados buscando un perfeccionamiento siempre deseable.

No debe olvidarse que los elementos térreos son tanto más atacables por los agentes de disolución naturales cuanto más finos son. La experiencia demuestra que, si se hacen digerir en frío en el ácido clorhídrico los elementos de un suelo clasificados por orden de tamaños, se observa que, para

pesos iguales de materia y para tiempos de contacto iguales, el ácido disuelve tanta más cantidad de substancias útiles á las plantas cuanto más finos son los elementos. Resulta de esto que no se debe efectuar un análisis con granos mayores que los que pasan por un tamiz de 1 milímetro. Esta repartición de la materia alimenticia, según la dimensión de las partículas, fué señalada, hace ya mucho tiempo, por Loughridge (1873).

Análisis mineralógico.—Este análisis está destinado á determinar *la naturaleza mineralógica* de los granos, llamados *arenosos,* que el análisis mecánico y físico ha separado mediante los procedimientos antes mencionados. Tiene real importancia, porque una tierra dada es el reflejo más ó menos inmediato de la roca de que procede.

El análisis mineralógico, de que hemos dicho ya algo en el Capítulo II, pág. 19, á menudo ha sido descuidado; las modernas investigaciones tienden á asignarle un lugar importante al lado de los análisis físico, mecánico y químico del suelo. Este género particular de análisis requiere conocimientos mineralógicos y geológicos especiales por lo que toca á la interpretación de los resultados obtenidos; pero, frecuentemente, basta pedir sólo conocimientos generales á este modo de investigación: en este caso, puede ser fácilmente hecho por el químico que se ocupe en agronomía.

Seremos muy breves respecto de este punto particular, recomendando al lector que estudie obras especiales de mineralogía microscópica, y principalmente la de F. Steinriede(1), en la cual este autor indica una marcha sistemática que permite la determinación de todas las especies mineralógicas que se encuentran en una tierra. Numerosos cuadros facilitan el empleo de los métodos descritos.

Las principales operaciones á que se acude en el análisis mineralógico consisten primero en el empleo de líquidos de densidades conocidas que permitan separar los diferentes componentes de una muestra arenosa determinada en ele-

(1) *Anleitung zur mineralogischen Bodenanalyse,* Leipzig, 1889.

mentos de la misma densidad. Se procederá luego á la medición de los ángulos de los cristales, cuando esto sea posible, á la medición de su índice de refracción, á un examen microscópico con luz ordinaria y con luz polarizada (convergente y paralela), á la determinación de sus dimensiones mediante una escala micrométrica.

Un ojo ejercitado distingue, á menudo, con bastante facilidad, con el simple examen microscópico, á qué roca ó á qué mineral común pertenece un fragmento aislado en el análisis mecánico de un suelo determinado: naturaleza de los ángulos, truncaduras, inclusiones, maclas, color, son otros tantos datos que permiten identificar la partícula examinada en tal ó cual cuerpo conocido. El examen polarimétrico, frecuentemente acaba de fijar la opinión en este punto. Es útil emplear algunos reactivos químicos en el mismo portaobjetos del microscopio (1).

Dumont procede de la siguiente manera: se elimina primero la materia húmica contenida en la muestra, inmergiendo ésta en una solución de nitrato cálcico al 50 por 100, en la cual flotan los restos orgánicos. Las arenas que quedan se limpian con ácido oxálico, y se lavan con ácido nítrico débil y con agua destilada. El residuo, inmergido en un líquido de densidad superior á la de la arcilla, se centrifuga. Las arenas que quedan en el fondo del tubo son expuestas en otro tubo que contiene un líquido de densidad 2,8 (yoduro de metileno); la centrifugación separa los elementos ferromagnésicos más pesados. Las partículas más ligeras que quedan en suspensión son centrifugadas en el seno de líquidos cada vez menos densos.

Tales son los principales procedimientos de análisis físico y las enseñanzas que de ellos pueden sacarse.

(1) El empleo de las llamadas *reacciones microquímicas* está hoy bastante extendido, ya que con ellas se puede muchas veces reconocer con facilidad la naturaleza de los cuerpos insolubles formados con las reacciones químicas. Puede consultarse sobre este punto la obra *Mickroskopische Reactionen* del Dr. K. Haushoffer, Brunsvick, 1885.—C. B.

Conocemos ahora la estructura física del suelo y las propiedades que de ella derivan. Así es que podemos emprender el estudio de las reacciones que modifican continuamente, y hasta en sus menores elementos, las substancias de que está formada la tierra de labor. Estas reacciones, *de orden químico y microbiológico,* constituyen el objeto de los siguientes capítulos.

CAPÍTULO VII

CONSTITUCIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA MINERAL DE LOS SUELOS

Nociones preliminares.—Fenómenos químicos y fenómenos microbiológicos.—Estudio de las disoluciones del suelo.—Extracción de estas disoluciones.—Naturaleza de los fenómenos químicos que producen las disoluciones normales del suelo.—Acido fosfórico. fosfatos; disolución continua del ácido fosfórico en el suelo.—Papel de las plantas en la disolución de los fosfatos insolubles del suelo.—Sílice, cloro, ácido sulfúrico.—Potasa y sus diversos estados en el suelo.—Sosa.—Cal.—Magnesia.—Fenómenos de doble descomposición.—Diálisis de la tierra de labor.—Diferentes formas de la materia mineral definidas según la acción de ciertos reactivos enérgicos.

Nociones preliminares sobre la constitución química de la materia mineral.—Hemos examinado detenidamente, en los tres capítulos anteriores, la estructura del suelo desde el punto de vista físico y hemos definido las propiedades derivadas de esta estructura. De las nociones que hemos adquirido podemos deducir las conclusiones siguientes: la circulación del agua y la del aire en el suelo están en estrecha relación con su constitución particular y sus propiedades físicas.

Ahora se nos presenta una nueva cuestión.

El análisis químico de las cenizas de una planta nos enseña que sus tejidos contienen ciertos elementos fijos que son siempre los mismos y cuyo papel fundamental han permitido reconocer los estudios de síntesis hechos en los vegetales. En el suelo es donde toman las raíces estos elementos *fijos:* ácido

fosfórico, potasa, cal, magnesia, etc. Hemos hecho constar su presencia y hemos definido la forma en que más frecuentemente se les encuentra. El nuevo problema que vamos á abordar puede resumirse así: los elementos minerales del suelo procedente de una roca primitiva han sido primero divididos en fragmentos más ó menos pequeños por la acción de los fenómenos mecánicos y físicos que anteriormente hemos descrito; al mismo tiempo, los fenómenos químicos de hidratación, de oxidación y de carbonatación, han actuado sobre estos fragmentos con una energía tanto mayor cuanto menor era su volumen y mayor, por consiguiente, su superficie. Estos últimos fenómenos continúan en el suelo sin interrupción, sin llegar nunca á un estado de equilibrio absolutamente estable. Aun cuando una tierra no recibiese abonos—capaces de introducir en ella materias extrañas y de provocar un nuevo ciclo de reacciones,—los elementos minerales preexistentes reaccionan unos con otros en contacto con el agua y ocasionan fenómenos de doble descomposición. Y se sabe que estos últimos nunca son completos en un sentido determinado y que dan lugar á *equilibrios*, limitados por la reacción inversa. La masa de las substancias presentes, esto es, *su concentración en la unidad de volumen*, desempeña un papel fundamental en los fenómenos de doble descomposición.

De lo que acaba de decirse se deduce la siguiente consecuencia: El análisis químico de la tierra de labor, cuyos métodos generales estudiaremos más adelante, tiene por objeto determinar, no sólo la cantidad total de substancias útiles á la vegetación que contiene un peso determinado de tierra, sino, sobre todo, la cantidad de estas substancias que se encuentran actualmente en una forma asimilable, esto es, ***absorbible*** por el vegetal. Veremos, sin embargo, que, á pesar de los esfuerzos hechos en este sentido desde hace sesenta años, no podemos dar más que con grandes reservas una solución aceptable del problema así planteado. La multiplicidad de los métodos analíticos, en un caso determinado, demuestra ella sola la impotencia en que nos encontramos para definir de una manera exacta cuál es el peso de materia alimenticia inmediatamente utilizable contenido en una parcela de tierra. Sin duda, no todos los vegetales tienen las mismas necesidades *cuantitativas;* pero, la razón principal de nuestra ignorancia respecto de la masa alimenticia disponible, y de los tan-

teos inevitables que lleva consigo toda operación de análisis químico, procede sobre todo de la imperfección de nuestros conocimientos relativamente á las reacciones naturales de doble descomposición que en el suelo se efectúan. Podemos entrever, según esto, cuál debe ser la orientación que hay que seguir si queremos estudiar la *estructura química íntima* del suelo.

Ante todo, debemos esforzarnos en tomar directamente del suelo la *forma* en que se encuentran los elementos que los vegetales pueden absorber fácilmente. Pues bien, es verosímil, *a priori*, que éstos se apoderarán tanto más fácilmente de una substancia indispensable cuanto mayor sea el estado de división en que se halle esta substancia en el suelo; también es de prever que, si el elemento en cuestión está disuelto en el agua, esto es, en el máximo de división, la planta podrá apropiárselo directamente en virtud de las leyes de la ósmosis.

La cantidad de agua que contiene un suelo determinado varía en cada instante. Pero se puede asegurar que, por lo general, esta agua abunda lo suficiente para disolver cierto número de los principios que requieren los vegetales. Las soluciones naturales son muy diluídas; pero, como pronto veremos, se regeneran continuamente en virtud de un fenómeno de equilibrio, incesantemente roto é incesantemente restablecido. El primer problema que conviene abordar es, pues, el de la composición de los líquidos que circulan en el suelo.

Sin embargo, este modo de alimentación por las disoluciones no es, tal vez, el único á que pueden acudir las plantas: las raíces deben, muy probablemente, actuar de *una manera directa* sobre la materia mineral sólida para extraer de ella ciertos elementos indispensables.

Hemos de hacer aquí una observación de carácter general. No encontramos actualmente más que suelos que podríamos llamar *derivados*, porque los suelos primitivos estaban exentos de materia orgánica y su constitución física debía ser ciertamente muy distinta de la que hoy conocemos en ellos.

Fenómenos químicos y fenómenos microbiológicos. —El suelo, cualquiera que sea el punto en que se examine, no está formado únicamente por materias minerales. En su origen, es cierto que faltaban del todo las materias orgánicas. Pero, cuando apareció la vida en la superficie del globo, la substancia orgánica de la planta se formó á expensas del carbono contenido en el gas carbónico atmosférico y á expensas del nitrógeno, ya en su forma elemental gaseosa, ya en una forma inorgánica desconocida: entonces apareció el cuarto elemento de los suelos, el *humus*.

Suponiendo que no contuviese ningún germen microscópico vivo, en la tierra de labor se efectuarían, sin embargo, modificaciones atribuíbles á los agentes físicoquímicos.

Pero, no ocurre nunca esto en las condiciones ordinarias. Hemos dicho anteriormente que las más pequeñas parcelas de un suelo cualquiera contenían siempre organismos vivos pertenecientes á muy variadas especies. Estos seres vivos, de dimensiones microscópicas, y cuyo número á veces es enorme, producen en el suelo, á lo menos la mayor parte de ellos, como han demostrado las investigaciones hechas respecto de este asunto desde hace treinta y más años, acciones químicas muy notables de las cuales se aprovechan directamente los vegetales. Pero estos seres no pueden vivir más que en presencia de materias hidrocarbonadas y nitrogenadas, de origen orgánico, de las cuales toman su alimento. No menos importantes son los seres microscópicos que, aun cuando carezcan de clorofila, pueden desarrollarse á expensas del gas carbónico. La materia orgánica, el humus, no desempeña, pues, solamente un papel químico, en el sentido propio de la palabra, determinando las reacciones múltiples que estudiaremos en el capítulo siguiente, sino que sirve, además, de *substratum,* de medio de cultivo en cierto modo, para numerosos organismos que en el suelo están diseminados.

Dos clases de fenómenos químicos se efectúan en la tierra de labor: por una parte, se observan en ella reacciones que se realizan únicamente entre elementos minerales y que están regidos por las leyes de la estática química y, por otra parte, reacciones cuyo origen debe buscarse en el desarrollo de los seres microscópicos íntimamente mezclados con las partículas minerales y orgánicas. ¿Cuál es la naturaleza de estas últimas reacciones? Comprenden principalmente:

1.° *Fenómenos de oxidación,* de donde resulta el transporte del oxígeno á la materia orgánica con producción de agua, de gas carbónico, de ácido nítrico. Esta función oxidante corresponde á los organismos llamados *aerobios;* su papel consiste en destruir la materia orgánica compleja y llevarla al estado mineral;

2.° *Fenómenos de reducción,* inversos de los precedentes, y caracterizados por una substracción de oxígeno á los cuerpos con que están en contacto los fermentos llamados *anaerobios.* Estos fenómenos reductores, correlativos de la ausencia más ó menos completa del oxígeno en el medio en que se desarrolla esta segunda categoría

de seres microscópicos, se manifiestan por un desprendimiento de gas carbónico, de hidrógeno, de metano, de nitrógeno libre.

Esta *química de los seres vivos en el suelo* será examinada detenidamente en el capítulo XI.

Pero, no debe perderse nunca de vista el hecho de que las dos categorías de fenómenos de origen diferente, cuya naturaleza acabamos de indicar, se entremezclan y se completan mutuamente; son inseparables unas de otras en una tierra normal.

La materia orgánica del suelo podría, en verdad, oxidarse sin el concurso de organismos vivos, por el simple contacto con el oxígeno del aire; sin embargo, como lo demuestra un gran número de experimentos, esta oxidación sería extremadamente lenta. Además, el nitrógeno que, en una forma compleja, forma parte integrante de la molécula húmica, se transformaría paulatinamente en amoníaco por la sola acción de las fuerzas químicas, pero la oxidación ulterior de este último, con formación de nitrógeno nítrico, parece irrealizable en ausencia de ciertos gérmenes vivos específicos ó, á lo menos, debe ser extraordinariamente lenta. Tampoco la mayoría de los vegetales, aptos solamente para apoderarse del nitrógeno del suelo en forma nítrica especialmente difusible, podrían utilizar el nitrógeno orgánico tal como se encuentra en el humus, á causa de su falta de difusibilidad y del estado particular de condensación que afecta.

Este vasto trabajo de simplificación, que es la resultante de fenómenos químicos y microbianos, es indispensable para la preparación de las materias difusibles que reclaman las plantas superiores: cuando los elementos útiles para el vegetal han tomado esta forma simple, él los absorbe y los transforma, en el mismo seno de su protoplasma, en substancias cada vez más complejas. De manera que, si se suponía un suelo ideal, donde existieran fosfatos minerales, sales potásicas, cálcicas, magnésicas, en disolución, nitratos disueltos (todas estas disoluciones en la proporción del milésimo al diezmilésimo), la química del suelo quedaría simplificada hasta el punto que no existiría ya: la planta se apoderaría directamente de las substancias en disolución y, con tal que la atmósfera ambiente le proporcionase oxígeno y gas carbónico, florecería, fructificaría y llegaría así al término de su existencia. Esto es, como se sabe, lo que ocurre cuando se hacen cultivos asépticos en el agua; las plantas se desarrollan tan bien, y á veces mejor que en la tierra, independientemente de la presencia de microorganismos y probablemente con el concurso, en el seno del líquido, de un número muy limitado de reacciones químicas.

Plan de las cuestiones que hay que estudiar. — No hemos de volver á ocuparnos, en las siguientes páginas, en las acciones químicas que podrían llamarse *primordiales*, que hemos estudiado en el capítulo II.

El estudio de las disoluciones minerales tal como existen

en el suelo, y la naturaleza de los fenómenos químicos que provocan, son los dos problemas que vamos á abordar en primer término. Después de una exposición sumaria de los fenómenos de doble descomposición, que rigen el equilibrio de los diferentes elementos minerales en la tierra de labor, diremos algunas palabras de la constitución íntima de las disoluciones en general. Terminaremos con el estudio de los diferentes estados en que se halla la materia mineral en el suelo, estados que se pueden intentar definir á partir de la manera como actúan ciertos reactivos sobre una muestra de tierra dada.

I

ESTUDIO DE LAS DISOLUCIONES DEL SUELO

En la exposición que vamos á hacer, generalmente dejaremos á un lado todo lo relativo á la intervención de las acciones microbianas. No examinaremos más que las reacciones *puramente químicas* que se efectúan en la tierra de labor. Pero, como hemos dicho antes, el quimismo de los seres microscópicos está tan íntimamente ligado con el quimismo de los elementos minerales que, á veces, deberemos, anticipadamente, hacer intervenir ciertos factores vivientes en los fenómenos de que vamos á tratar.

Hemos señalado antes la importancia de las disoluciones del suelo; añadiremos que esta importancia ha crecido mucho en los últimos años, pues que la mayoría de los autores opinan, tal vez de un modo algo exclusivo, que las plantas no absorben las substancias minerales que necesitan más que cuando están disueltas.

Entendemos aquí con la palabra *disolución* el fenómeno en el cual una substancia mineral *desaparece enteramente* en un líquido, como el agua, formando con este líquido un *medio físico homogéneo*. Estos fenómenos de disolución deben, *a priori*, ser muy lentos, porque la mayor parte de los elementos del suelo son muy poco solubles en el agua.

Según Dumont, lo que contribuye, además, á retardar el contacto del agua cargada de gas carbónico con los elementos, es que éstos *no están libres* de un modo absoluto, sino que están cementados entre sí y recubiertos de una especie de revestimiento orgánico que los protege. Para que esta capa desaparezca es necesario que los coloides que envuelven las partículas se separen temporalmente de ellas: esto es lo que ocurre por efecto de acciones mecánicas ó físicas, ó de ciertas reacciones químicas. Pero, á causa de la intervención de estas últimas, cuyo resultado es poner en libertad momentáneamente á los elementos minerales, los coloides renacen, envuelven de nuevo las partículas minerales y limitan así la acción disolvente del agua. Se deduce de todo esto, por otra parte de acuerdo con la observación, que deben existir en el suelo especies minerales de una pequeñez extremada, cuya duración, si no indefinida, es á lo menos muy larga.

Presencia en el suelo de substancias solubles ó en disolución. - Una tierra cualquiera contiene siempre substancias solubles en el agua. En efecto, si hacemos filtrar cierto volumen de este líquido á través de una muestra de tierra, y evaporamos á sequedad el líquido que escurre, obtendremos un residuo más ó menos abundante, más ó menos coloreado, que contiene á la vez materias fijas y materias orgánicas. Las aguas que han lavado un suelo en la naturaleza (aguas de infiltración), las aguas de río, las aguas de fuente, se comportan de la misma manera: pero, los residuos obtenidos por evaporación de volúmenes iguales de estas aguas, varían en calidad y en cantidad, según las circunstancias.

Nos ocuparemos más adelante en la composición de las aguas de infiltración; no consideramos aquí más que los siguientes puntos: ¿Cuáles son las substancias que se ha llevado consigo el lavado del suelo? ¿se encuentran en disolución, en pesos variables, todas las substancias cuya presencia en el suelo en estado sólido está reconocida y que forman parte de las cenizas vegetales? Unas materias son bastante abundantes en las aguas de lavado; otras, por el contrario, están contenidas en ellas en escasa proporción. Entre las primeras se encuentran, generalmente, la cal y el ácido nítrico combinado con la cal; luego siguen la sosa, la magnesia, la sílice, el cloro, el ácido

sulfúrico (estas dos últimas substancias varían mucho en cantidad de un suelo á otro). Entre las segundas, se encuentran la potasa, el ácido fosfórico y el amoníaco; estas dos últimas pueden no existir más que en indicios. De este primer ensayo de grosera clasificación, ya se deduce: 1.°, que existen en el suelo ciertas materias que pueden disolverse en el agua, y que se pueden separar mediante un lavado apropiado; 2.°, que todas estas materias forman parte de la trama mineral de los vegetales y que, casi todas, desempeñan un papel fisiológico capital; 3.°, que ciertas substancias, á menudo muy abundantes en el esqueleto sólido del suelo, no se hallan en las aguas de loción más que en muy escasas proporciones; 4.°, que estas últimas materias, disueltas por el agua en cantidad casi infinitesimal, parecen ser *retenidas* de un modo particular por alguna propiedad especial del suelo. Esta propiedad especial será ulteriormente examinada con el nombre de *poder absorbente;* es la resultante de un conjunto de fenómenos físicos y químicos, y depende, ante todo, de la naturaleza de la tierra considerada.

Método de extracción de las verdaderas disoluciones del suelo. — Schlœsing fué el primero (1866) en proponerse resolver el problema siguiente: extraer de un suelo, sin desnaturalizarlas, las disoluciones que este suelo contiene en un momento dado, cualesquiera que sean su profundidad, su grado de humedad y la composición de su atmósfera confinada. Esta extracción puede efectuarse simplemente con agua destilada. El citado autor se ha asegurado de ello, procediendo primero al siguiente ensayo: Se humedecen 1 200 gramos de arena lavada y desecada con una disolución de sal marina, que contenga 0,10 gramos de sal en 10 centímetros cúbicos. Se pone la arena en una alargadera cilíndrica, se aprieta ligeramente, luego se recubre con algodón mojado, destinado a repartir el agua destilada, que se verterá en la superficie de la arena. Se va vertiendo el agua á razón de 40 centímetros cúbicos por hora. Se recoge el líquido que escurre por porciones de 10 centímetros cúbicos y se determina en ellas el cloro. La experiencia enseña que, á lo menos las tres cuartas partes de la disolución, escurren sin cambio de composición, porque, en las porciones recogidas sucesivamente, se encuentra una proporción de cloro muy sensiblemente igual á la contenida en 10 centímetros cúbicos del líquido primitivo. Esta extracción del líquido salado parece efectuarse del

siguiente modo. Supongamos que la arena embebida de la disolución salina, esté en forma de capas horizontales muy delgadas en las cuales el agua destilada que se vierta en ellas desciende en capas paralelas. La capa más superficial se encuentra mezclada con un gran exceso de agua pura; esta capa cede á la siguiente una primera mezcla de agua y solución salina; la segunda capa cede á la tercera una mezcla algo más rica en sal; por último, una cierta capa recibirá de la capa que tiene inmediatamente encima un líquido cuya composición será muy parecida á la de la disolución inicial de cloruro sódico, que se pone en contacto con la arena. La disolución contenida en las capas subyacentes será *simplemente desalojada;* saldrá, pues, de la alargadera con su composición primitiva. Este desalojamiento, como hace notar Schlœsing, se produce aun en la arena completamente escurrida.

Se pueden idear muchas disposiciones que permitan observar directamente el desalojamiento de un líquido. Se humedece 1 kilogramo de arena primero con 100 gramos de agua. Se vierte luego en la parte superior del tubo que contiene la arena agua coloreada (con carmín ó con violeta de metilo). Esta última desciende de una manera uniforme y, cuando principia á salir por la parte inferior del tubo, ha desalojado próximamente unos 85 centímetros cúbicos de agua incolora. Este experimento puede modificarse como sigue: Se humedecen con una solución alcohólica de fenolftaleína las paredes de una pequeña campana graduada, destinada á recoger el líquido que escurre, y se vierte en la arena, mojada como antes, una solución muy diluída de potasa (1 por 100 aproximadamente). Mientras no sale más que agua pura, la fenolftaleína permanece incolora; pero, desde el momento en que aparece el menor indicio de álcali, la fenolftaleína toma una hermosa coloración roja. Se mide entonces el volumen del líquido escurrido y se encuentra sensiblemente que 85 centímetros de este líquido son incoloros.

Disoluciones de la tierra de labor. — Demostrada así la posibilidad de la extracción de un líquido que impregna una masa arenosa, Schlœsing aplicó el método precedente á la obtención de las disoluciones contenidas en la misma tierra de labor. De todos modos, no está ya formada como la arena por elementos lisos y, poco más ó menos, uniformes después de la tamización, sino que contiene partículas porosas, de

tamaño variable, entre las cuales los líquidos circularán, sin duda, con menos regularidad. Si el desalojamiento de las soluciones normales del suelo puede efectuarse como en el caso de la arena, empleando el procedimiento antes expuesto, se conocerá esto en que los líquidos recogidos tendrán una composición constante: la experiencia demuestra que, efectivamente, este desalojamiento es posible. Pero si, partiendo del peso de la tierra con su proporción de humedad, se calcula el volumen total de la disolución, se llega á la conclusión de que no se pueden recoger, como antes, las tres cuartas partes y aun más, de la disolución intacta, sino solamente una tercera, una cuarta ó una quinta parte, según la altura de la tierra y la abundancia de la disolución. Para obtener un litro á lo menos de líquido, Schlœsing opera con 35 á 40 kilogramos de tierra puestos en una gran campana tubulada invertida. Por medio de una disposición automática muy ingeniosa, cada unidad de superficie recibe exactamente la misma cantidad de agua destilada. He aquí las cifras que expresan, en miligramos, la cantidad de substancias contenidas en 1 litro de disolución con muestras variadas de tierras:

	Tierra arcillocalcárea de Boulogne		Tierra arcillo-calcárea de Issy		5 tierras arcillosilíceas de Neuphle-le-Château (Seine-et-Oise)
	Sin abono desde 10 años y con cultivo de tabaco	Fuertemente abonadas con estiércol y adicionadas de abonos potásicos	I	II	
Ácido carbónico	117	199	480	1438	138 á 200
Acido nítrico	305	332	154	231	15 á 600
Cloro	7	6	6		12 á 46
Acido sulfúrico	58	75	50	50	22 á 50
Acido fosfórico y hierro	0,8	2,8	0	0	0,5 á 1,5
Sílice	29	32	26	34	2,3 á 48
Amoníaco	indicios	indicios	indicios	indicios	0 á 0,8
Cal	264	227	301	694	130 á 311
Magnesia	13	20	21	47	15 á 33
Potasa	7	157	3	2,6	0 á 5
Sosa	8,8	14	27	38	18 á 42
Materia orgánica	37	90	64	87	24 á 50

El examen de estas cifras sugiere las siguientes consideraciones: Entre los elementos disueltos en el suelo, unos se hallan en relativa abundancia: cal, ácido nítrico, sosa; otros en proporciones muy variables: cloro, ácido sulfúrico, sílice; y algunos están en escasa proporción: magnesia, potasa (excepto en el caso en que se ha adicionado al suelo una abundante cantidad de esta base como abono); y, por fin, otros pueden no existir más que en indicios: amoníaco, ácido fosfórico. Se deduce de esto que, según antes hemos dicho, un suelo debe retener ciertos elementos, mientras que otros son fácilmente movibles y desalojables por el agua pura. Además, parece que estas disoluciones normales tienen una concentración del todo insuficiente para alimentar las plantas que introducen sus raíces en un suelo de esta naturaleza. Por esta razón se ha admitido á menudo, y la cosa parece probable en muchos casos, que las raíces toman directamente los elementos que necesitan de las materias sólidas entre las cuales se introducen.

Pronto veremos, sin embargo, que las soluciones normales del suelo se regeneran á medida que las plantas las absorben.

II

NATURALEZA DE LOS FENÓMENOS QUÍMICOS QUE PROVOCAN LAS DISOLUCIONES NORMALES DEL SUELO

El agua, como hemos repetido varias veces, es muy mal disolvente de las substancias contenidas en las rocas, cuando es absolutamente pura. Pero, la presencia del gas carbónico aumenta ya su poder de disolución: además, se encuentra en el suelo en contacto con algunas substancias fácilmente solubles (cloruro sódico, nitratos, etc.) que modifican este poder de un modo notable. Sería, pues, preciso, si se quisiere emprender un estudio racional de las acciones químicas que se efectúan en el suelo, poner en presencia de variadas muestras de tierras soluciones carbónicas de concentración conocida y líquidos acuosos que contuviesen una determinada proporción de las sales que el agua disuelve fácilmente al atravesar el suelo. Este estudio ha sido hecho en lo que se refiere á la acción del gas carbónico sobre los carbonatos de calcio y de magne-

sio; ya hemos hablado de ello anteriormente. En cuanto al conocimiento de la acción de los líquidos salinos de valor conocido, se ha hecho poco. Sin embargo, en estos últimos años, Cameron, Bell y Robinson han emprendido interesantes investigaciones, de orden teórico, relativas á los equilibrios que se establecen entre las diferentes sales solubles incorporadas á suelos de reacción alcalina (CO^3Ca). Pero la exposición de estas investigaciones saldría de los límites de una obra elemental.

Parece evidente, *a priori*, que no se pueden imitar más que de una manera aproximada los procedimientos que emplea la naturaleza para atacar los fragmentos de las rocas. Tratemos, sin embargo, á continuación—á fin de definir lo mejor que sea posible el grado de alterabilidad de los minerales del suelo y, por consiguiente, el poder de que están dotados de ceder al vegetal tal ó cual materia nutritiva,—de hacer actuar sobre la tierra de labor disolventes *naturales*, y veamos lo que ocurre en estas condiciones.

Examinemos por de pronto la *acción del agua* respecto de algunos de los elementos que se encuentran constantemente en las cenizas vegetales. Veremos más adelante, en el capítulo relativo al análisis químico de los suelos, cómo se ha puesto en práctica este procedimiento racional de ataque de la tierra con los disolventes naturales.

A. Ácido fosfórico: fosfatos.—El fosfato tricálcico—que no es, por otra parte, el único fosfato mineral existente en el suelo, pero que es ciertamente el más importante—preparado por neutralización del ácido fosfórico por la cal, es extremadamente poco soluble en el agua privada de gas carbónico por la ebullición. Schlœsing evalúa en 0,00074 gramos la cantidad de este fosfato que un litro de agua puede disolver. Pero se disuelve en el agua cargada de gas carbónico en tanta mayor proporción cuanto más gas carbónico contenga el agua. Esta agua, cargada de gas carbónico á la presión ordinaria, disuelve 0,153 gramos por litro, ó sea una parte de fosfato en 6563 partes de agua (Joffre). Según este mismo autor, el *apatito*, esto es, el fosfato cristalizado, sería algo menos soluble. Sin embargo, se han publicado cifras mucho más elevadas relativas á la solubilidad de esta sal á la presión ordinaria en el agua pura. El *estado físico* del cuerpo desempeña un papel importante en este caso. Un fosfato calcinado ó cristalizado es mucho menos soluble que un

fosfato amorfo recién precipitado. Schlœsing hace notar que las disoluciones que se encuentran ordinariamente en el suelo no contienen más fosfato tricálcico que el que sería capaz de disolver el agua hervida. En efecto, según hemos indicado ya anteriormente, el gas carbónico contenido en estas disoluciones no aumenta la solubilidad del fosfato cuando este gas está asociado con la cantidad de bicarbonato cálcico correspondiente á su tensión, como ocurre en los suelos que no están absolutamente desprovistos de calcáreo.

Entre los disolventes naturales del fosfato tricálcico, deben citarse la sal marina, que se encuentra muy frecuentemente en el suelo, y el nitrato sódico, añadido como abono. Un litro de agua que contenga 2 gramos de cloruro sódico disuelve 0,0457 gramos de fosfato tricálcico; 1 litro de agua que contenga 3 gramos de nitrato sódico disuelve 0,0330 gramos de fosfato. Pero estas concentraciones salinas no existen nunca en la tierra de labor; ó á lo menos no existen más que excepcionalmente. Sólo indicamos estas cifras para demostrar que, además del gas carbónico, pueden intervenir otros disolventes que aumenten la solubilidad del fosfato tricálcico. Señalemos, por último, el hecho de que el fosfato tricálcico es ligeramente disociado por el agua que se vuelve ácida con su contacto (Warington).

El ácido fosfórico se halla también en el suelo unido á otras bases además de la cal: el *fosfato magnésico* se comporta poco más ó menos como el fosfato tricálcico; el *fosfato férrico normal* $P^2O^5Fe^2O^3$ se disolvería en 12500 veces su peso de agua cargada de gas carbónico; su solubilidad sería mayor en presencia de materias húmicas. Conviene tener esto presente; además, el fosfato tricálcico mismo entra frecuentemente en combinación con la materia orgánica que actúa sobre él á manera de ácido. Volveremos á este caso particular á propósito de la constitución de la materia húmica. Los fosfatos de aluminio y de hierro son menos solubles en presencia del nitrato sódico que en el agua pura.

Resulta de lo que precede que las soluciones que hemos llamado *normales* del suelo deben ser extremadamente pobres en ácido fosfórico, y debe deducirse de esto que, si las plantas cultivadas no pudiesen absorber más que una cantidad tan exigua de este elemento indispensable, nunca llegarían á su plena madurez. Conviene ahora entrar en pormenores y examinar *cuál es el valor* de estas disoluciones fosfóricas; es preciso saber también cuáles son las partes de las raíces que intervienen en este fenómeno de solubilización. Puede perdonársenos lo largo de la siguiente exposición por la importancia del asunto y por el valor de los trabajos publicados sobre este tema.

CONTINUA DISOLUCIÓN DEL ÁCIDO FOSFÓRICO EN EL SUELO.— Schlœsing hijo (1898-1899) se propuso investigar si estas disoluciones tan pobres se renovaban á medida que eran utilizadas por las plantas y si su constante reaparición compensaba su pobreza. El autor emplea para la extracción de las disoluciones del suelo el procedimiento de desalojamiento mediante el agua anteriormente descrito, y determina el ácido fosfórico así extraído en estado de fosfomolibdato amónico con las precauciones de costumbre: este procedimiento permite evaluar de una manera muy exacta fracciones de miligramo de ácido fosfórico.

El análisis de estas disoluciones, por de pronto pone de manifiesto el siguiente notable hecho: en una misma tierra, considerada en una misma época, *el valor de la disolución en ácido fosfórico, esto es, la cantidad de este ácido contenida en 1 litro de disolución, es casi constante é independiente de la riqueza del suelo en agua;* la proporción de humedad del suelo puede variar de uno á cuatro. De manera que la cantidad de ácido fosfórico disuelto contenida en un suelo debe resultar de un equilibrio entre acciones químicas muy complejas, difíciles de precisar, pero que son de tal manera que, si, por ejemplo, la proporción de este ácido disminuye por efecto de la absorción vegetal, el valor primitivo (muy variable de una tierra á otra) se restablece; inversamente, si la solución tiende á concentrarse á causa de la disminución de la proporción de humedad del suelo, cierta cantidad de ácido fosfórico se vuelve insoluble. Esta constancia de la riqueza fosfórica es explicable por el hecho de que la cantidad de ácido disuelta es muy pequeña comparada con el peso de los fosfatos que la mantienen ($\frac{1}{2000}$ á lo más). Se comprende, pues, que, si las soluciones fosfóricas se renuevan constantemente en el suelo cuando son absorbidas por las plantas, la presencia de este ácido en disolución será un factor que deberá tenerse en cuenta desde el punto de vista de la alimentación vegetal.

Pero el método de *desalojamiento* constituye una manipulación larga y penosa, requiriendo el empleo de un peso de tierra bastante

considerable. Schlœsing hijo substituye este método por el siguiente, de ejecución mucho más rápida, que consiste, no ya en extraer las mismas disoluciones, sino en preparar artificialmente otras que tengan el mismo valor. He aquí algunas detenidas explicaciones sobre esta materia:

Se ha dicho antes que, cuando la humedad de una tierra pasaba á ser doble ó cuádruple, el valor de la disolución fosfórica permanecía constante. Pues bien, la tierra puede contener, no ya la vigésima, la décima ó la cuarta parte de su peso de agua, sino 4 ó 5 veces su peso, y aun más, *sin que su valor en ácido fosfórico varíe*. De ahí deriva el siguiente procedimiento de extracción, que se funda esencialmente en la agitación de una pequeña cantidad de tierra con agua, observando las siguientes precauciones: El material necesario para esta operación consiste en un frasco de 1 500 cm.^{3} cerrado por un tapón de caucho que contiene la tierra y el agua. Se pone este frasco en un aparato capaz de hacerle girar de un modo continuo alrededor de un eje perpendicular á él: cuando el experimento ha durado un tiempo determinado, se deja reposar un poco el frasco, se decanta el líquido claro en un filtro y se determina, como se ha dicho antes, el ácido fosfórico. La tierra era siempre tierra *natural*, pasada simplemente por un tamiz de mallas de 4 á 5 milímetros. El citado autor estudia la influencia de los diversos factores en la distribución del ácido fosfórico entre el agua y la tierra: influencia de las proporciones relativas de estas dos substancias, del desgaste de los elementos por el frote, de la velocidad y de la duración de la rotación, de la naturaleza del agua. De este estudio preliminar deduce que, en las condiciones de sus operaciones, el peso de P^2O^5 disuelto no se eleva más que muy lentamente á partir de cierto peso de tierra; este peso tiende hacia un límite. Este no es absolutamente fijo para cada tierra, porque el desgaste de los elementos es tanto mayor cuanto más grande es el peso de tierra empleado. Sin embargo, se alcanza de una manera suficiente el equilibrio entre la tierra y el agua. Un peso de unos 300 gramos de tierra suministra el mismo valor en P^2O^5 que el método de desalojamiento.

Las condiciones de realización de un experimento exacto serán, pues, las siguientes, tales como resultan de la observación de las influencias diversas antes estudiadas. Siendo el peso de tierra de 300 gramos, el volumen del agua, comprendido el de la humedad de esta tierra, será de 1 300 centímetros cúbicos, el volumen del frasco será de 1 500 centímetros cúbicos, la velocidad de rotación de 2 vueltas por minuto, á fin de restringir todo lo posible el fenómeno de disolución producido por el desgaste mutuo de los elementos, y, por último, la duración de la agitación de 10 horas. Relativamente á la naturaleza del agua que se ha de emplear, el autor hace observar que la presencia, en este líquido, de gas carbónico, no facilita el ataque de los carbonatos del suelo más que si este gas existe sin haber disuelto carbonato cálcico en estado de bicarbonato; pero, que esta influencia disolvente se anula cuando el agua, conte-

niendo gas carbónico, al mismo tiempo contiene bicarbonato cálcico en saturación (pág. 228). Como muchas aguas naturales se encuentran en este último caso, se podrá emplear, generalmente, el agua ordinaria para investigar el ácido fosfórico soluble.

Este segundo procedimiento, mucho más rápido que el procedimiento de desalojamiento, ha permitido comprobar el hecho, ya antes mencionado, de que, cuando se pone agua en contacto con una tierra de cualquier constitución, se disuelve una muy pequeña cantidad de ácido fosfórico, cuya proporción por litro es independiente del volumen de agua, y sensiblemente igual á la del ácido fosfórico que se encuentra en las soluciones naturales que impregnan esta misma tierra en el campo. El valor de la disolución no cambia si se hace variar el peso de agua de 1 á 100 para un mismo peso de tierra. Esta proporción constante de ácido fosfórico en la disolución que impregna una tierra dada, puede ser considerada como una característica de esta tierra. Cuando las plantas en vegetación la absorben, reaparece poco á poco en el mismo estado de concentración; esta renovación parece ser tal, que puede suministrar á una planta, durante veinticuatro á treinta semanas que dure su evolución, de 10 á 30 kilogramos de ácido fosfórico por hectárea, esto es, la cantidad aproximadamente necesaria para la obtención de buenas cosechas. Este modo de absorción no excluye el que admiten muchos autores, según los cuales los fosfatos sólidos del suelo son disueltos directamente en contacto con las raíces, gracias á la acidez de los jugos que éstas segregan. *El ácido fosfórico disuelto se añade entonces al ácido fosfórico de los fosfatos sólidos.*

Para apoyar esta opinión, Schlœsing hijo se ha asegurado directamente de que las plantas pueden alimentarse de una manera completa, ó á lo menos en gran parte, con ácido fosfórico disuelto en las dosis ínfimas que el suelo contiene. Se hizo la experiencia con *el maíz, el alforfón, las judías, el trigo.* Para hacer esta demostración, se emplea la siguiente disposición: en dos grandes campanas de vidrio invertidas, de 20 á 40 litros de capacidad, se pone arena cuarzosa, que recibe, durante diez horas por día, 10 litros de una solución hecha con agua de Vanne de 0,200 gr. de nitrato potásico, 0,02 gr. de sulfato magnésico y de una dosis de fosfato potásico, en la cual la cantidad del ácido fosfórico variaba, por litro, de 0 á 2 miligramos. Se introducirá, además, en cada campana, una pequeña cantidad de óxido de hierro: después se recogerán las aguas que escurran por una abertura inferior de la campana y se determinará en ellas el ácido carbónico.

He aquí el cuadro de una sola de las experiencias del citado autor; los demás ensayos dieron resultados análogos.

TRIGO DE MARZO
(pesos expresados en miligramos)

		I	II
P^2O^5 introducido en la solución nutritiva por litro.		0,500	1,000
P^2O^5 contenido naturalmente en un litro de agua de Vanne		0,066	0,066
P^2O^5 dado á las plantas por litro de disolución.		0,566	1,066
P^2O^5 por litro en los líquidos recogidos á la salida de las campanas	25 de abril-13 de mayo	0,28	0,65
	14 de mayo-31 de mayo	0,15	0,39
	1.º de junio-16 de junio	0,05	0,10
	17 de junio-30 de junio	0,03	0,11
	1.º de julio-16 de julio	0,03	0,13
	17 de julio-1.º de agosto.	0,07	0,36
	2 de agosto-16 de agosto.	0,07	0,59

	I		II	
	Peso de la cosecha en gramos	P^2O^5 en miligramos	Peso de la cosecha en gramos	P^2O^5 en miligramos
Cosecha desecada á 40° — Paja	47,755	105,3	52,210	137,8
Cosecha desecada á 40° — Grano	5,300	58,3	10,250	107,6
	53,055	163,6	62,460	245,4

Por lo tanto, las plantas han utilizado el ácido fosfórico en las ínfimas dosis en que se les ha suministrado. Se notará que el valor de los líquidos escurridos primero disminuye, lo que puede proceder, ó bien de la retención de una parte de P^2O^5 por el suelo, ó bien de la absorción de este ácido por las plantas, ó de las dos acciones á la vez. Las determinaciones del 25 de abril al 13 de mayo, han dado 0,28 mgr. y 0,65 mgr. de ácido. Si la fijación por el suelo hubiese sido la única causa de empobrecimiento de los líquidos que escurrían, el valor, después del 13 de mayo, hubiera debido subir poco á poco, á 0,57 mgr. en el primer caso, á 1,06 mgr. en el segundo. Pero el valor ha continuado bajando: por lo tanto, las raíces han absorbido el ácido fosfórico disuelto, hasta el momento en que, disminuyendo la actividad de la vegetación, el valor de los líquidos escurridos ha aumentado. El peso de la cosecha núm. II ha sobrepujado al de la cose-

cha núm. I, porque las plantas han tenido á su disposición una cantidad de ácido fosfórico tanto más elevada cuanto el valor inicial de este ácido era más alto. En los ensayos testigos, en que no se ha dado ácido fosfórico á las plantas, la dosis de ácido contenida naturalmente en el agua, ha sido demasiado escasa para mantener la vegetación: por esto las plantas eran raquíticas, aun cuando se hubiesen apoderado con facilidad de la mayor parte de los vestigios de ácido existentes en el agua de riego.

He aquí un punto muy importante que podemos considerar como definitivamente fijado: las soluciones naturales que contienen los suelos pueden alimentar las plantas con ácido fosfórico, aun cuando este ácido no exista más que en indicios: en efecto, á medida que es utilizado, estas soluciones se renuevan sin cesar. Pronto encontraremos hechos análogos en el caso de la potasa.

PAPEL DE LAS PLANTAS EN LA DISOLUCIÓN DE LOS FOSFATOS INSOLUBLES DEL SUELO.—El papel que desempeñan las disoluciones del suelo, como ya hemos observado antes, no es exclusivamente alimenticio. Las raíces intervienen de una manera activa para solubilizar los fosfatos insolubles y, probablemente todos los demás elementos minerales que reclama el vegetal. Esto es lo que se desprende claramente de los siguientes experimentos de Kossowich (1903), que confirman, de una manera general, las conclusiones formuladas por Schlœsing hijo y las completan en muchos puntos.

Kossowich efectúa tres series comparativas de ensayos. En la primera serie, el sistema radicular de las plantas (mostaza, guisantes, lino), se desarrolla en un medio sólido (6 kilogramos de arena contenidos en un cilindro metálico de 10 centímetros de altura, mezclados con una cantidad conocida de fosfatos naturales pulverizados, que contenían 5 gramos de ácido fosfórico). Las plantas pueden utilizar, pues, el ácido fosfórico, que entra por sí mismo en disolución por la acción del líquido nutritivo, exento de fosfatos, puesto á su disposición y cuya composición se indica más adelante. Además, pueden emplear el que disuelven directamente sus raíces. En la segunda serie, las plantas no disponen más que del ácido fosfórico que puede ser disuelto, *sin la intervención de las plantas*, por la solución nutritiva que filtra á través de la arena mezclada con fosfatos en polvo. Esta arena era continuamente humedecida por esta solución nutritiva (5 litros en veinticuatro horas), que contenía por

litro: 0,02 gr. de NO^3K, 0,02 gr. de $CaCl^2 6H^2O$, 0,02 gr. de SO^4Mg, 0,01 gr. de $FeCl^3$. Los vasos de la segunda serie eran dobles. Los que no contenían plantas estaban dispuestos como los vasos de la primera serie y contenían, por consiguiente, arena y fosfatos insolubles. La solución nutritiva que acabamos de indicar, atravesaba el primer vaso y el líquido que de él salía era conducido al segundo vaso de vegetación, plantado y dispuesto como los vasos de la primera serie, *pero sin fosfatos*. En esta segunda serie, los vegetales no tenían, pues, á su disposición, en cuanto se refiere al ácido fosfórico, más que el que disolvía el líquido nutritivo al atravesar el primer vaso no plantado.

La germinación fué normal en las dos series; pero, desde el fin de la primera semana, las plantas de la primera serie se desarrollaron mucho mejor que las de la segunda, que quedaron raquíticas. Se puede deducir de esto que la utilización directa por los vegetales de ciertos cuerpos insolubles que pueden encontrarse en el suelo, debe desempeñar un papel muy importante en su nutrición.

En la tercera serie de experimentos, las plantas eran alimentadas *con soluciones muy diluídas de fosfatos*, á fin de comparar su desarrollo con el de las plantas de la primera serie y, en parte, con el de las plantas de la segunda (comprobación de los experimentos de Schlœsing hijo). Se empleaban vasos, análogos á los anteriores, que se llenaban de arena, sin fosfatos insolubles, y recibían la solución nutritiva adicionada de 0,0013 gr. de P^2O^5 por litro. Otros tres vasos, plantados del mismo modo, recibían una solución que contenía 0,0326 gr. de P^2O^5 por litro (25 veces más); un último vaso recibía las sales nutritivas contenidas en una disolución 10 veces más diluída que la de los vasos anteriores, pero cada litro contenía, sin embargo, 0,0013 gr. de P^2O^5.

En las soluciones muy diluídas de P^2O^5, las cosechas fueron relativamente elevadas, más pequeñas, con todo, que usando la solución fosfórica en 25 veces más concentrada: esto confirma los resultados obtenidos por Schlœsing hijo; pero se ve, al mismo tiempo, que si en la segunda serie de ensayos, la solución nutritiva hubiera disuelto el ácido fosfórico de los fosfatos insolubles en cantidad muy escasa, pero sin embargo, suficiente, las plantas de los correspondientes vasos no habrían vegetado de una manera tan raquítica. Resulta, pues, que la solución nutritiva apenas disuelve ácido fosfórico al filtrar al través de arena mezclada con fosfatos en polvo: de donde deriva la imposibilidad de un desarrollo normal de las plantas de la segunda serie. Las de la primera no se desarrollan de una manera satisfactoria más que por efecto de la intervención de un sistema radicular que disuelve directamente los fosfatos insolubles.

Desde el punto de vista de la *distribución de las raíces* en las tres series, he aquí algunas observaciones importantes. Las raíces de las plantas de la primera serie, penetraban en la arena y formaban una red en el fondo del vaso; en la segunda serie la red radicular

sólo llegaba á la mitad del vaso; en la tercera serie, el sistema radicular estaba poco desarrollado, estaba concentrado sobre todo en la parte de arriba.

¿Cómo se efectúa esta *disolución directa* de los fosfatos en contacto con las raíces? Kossowitch cree que el gas carbónico que éstas segregan por respiración, desempeña un papel esencial en este ataque; pero, en este punto, las secreciones no parecen tener la misma intensidad en los diferentes vegetales. Se puede admitir también que ciertos ácidos orgánicos (oxálico, fórmico, cítrico), segregados por las raíces en condiciones todavía mal definidas, no son extraños á la disolución de las materias minerales que se hallan en íntimo contacto con los pelos absorbentes. Pero conviene hacer sobre este punto formales reservas hasta nueva orden.

Ácido fosfórico soluble y fertilidad del suelo.—Estudiando, por medio del procedimiento de Schlœsing, el desalojamiento de los líquidos contenidos en la tierra, Pouget y Chouchak (1910) encuentran que existe una relación, á menudo poco marcada, entre el rendimiento de los cultivos y las proporciones de ácido fosfórico soluble en el agua que contienen las diversas tierras examinadas. La *concentración del agua del suelo* en ácido fosfórico no parece ser, pues, el único factor que debe considerarse. Existen otros dos que tienen gran importancia: la *velocidad* de la disolución del ácido y el *agotamiento progresivo del suelo* ocasionado por la vegetación. Pues bien, la experiencia enseña que las cantidades de ácido fosfórico disueltas en el agua son tanto mayores cuanto más corto es el tiempo de contacto del agua con la tierra: es éste un fenómeno comparable al de la *retrogradación* de los superfosfatos. Al principio del contacto, ciertos fosfatos se disuelven rápidamente; pero, después, por efecto de diversas reacciones, los fosfatos disueltos se precipitan parcialmente, y la riqueza primitiva disminuye. Resulta que, siendo grande la velocidad de disolución, este factor intervendrá poco en la nutrición. También, á pesar de la absorción del ácido fosfórico por la planta, la concentración del ácido seguirá constante, á menos que éste se agote. Estudiando las causas del agotamiento, Pouget y Chouchak llegan á la conclusión de que el ácido fosfórico existe en el suelo *en dos formas diferentes*, una de las cuales (forma orgánica de fosfohumatos ó compuestos análogos) es mucho más soluble que la otra (forma

mineral). Los primeros agotamientos producidos por el agua quitan sobre todo la primera forma; los últimos extraen la segunda. La primera forma tiene mayor influencia en los principios de la vegetación; la acción de la segunda predomina en la elaboración de la cosecha final.

En la mayor parte de las tierras examinadas por los autores, las cantidades de ácido fosfórico correspondientes á la primera forma son pequeñas y se encuentran agotadas mucho antes de que las plantas hayan adquirido su completo desarrollo. A partir de este momento, interviene la segunda forma sola. Pero, cuando se trata de suelos muy fértiles, la primera forma es abundante; basta, de sobras, para las necesidades de la vegetación, que no puede agotarla; también, en este caso, los rendimientos son proporcionales á la concentración del agua del suelo en ácido fosfórico. Las disoluciones del suelo desempeñan un papel tanto más importante cuanto mayor es su concentración.

Causas indirectas de la solubilización de los fosfatos. —Entre los agentes más enérgicos que solubilizan el ácido fosfórico deben contarse los microorganismos del suelo. Hablaremos ulteriormente de la actividad microbiana en general; pero, en lo que se refiere al tema de que tratamos ahora, es indispensable completar los datos que preceden con las siguientes consideraciones:

Hemos visto que, según Pouget y Chouchak, la forma esencialmente asimilable del ácido fosfórico era una *forma orgánica*. Debe ser así muy probablemente. En efecto, Stalström (1902) ha demostrado que la materia orgánica del suelo, cuando está esterilizada, no puede solubilizar al fosfato tricálcico, á menos que esta materia tenga carácter ácido. La solubilización de los fosfatos debe ser atribuída, en gran parte, á lós microorganismos del suelo; depende de la naturaleza de la materia orgánica y de la de los microbios que la atacan. Kröber (1909) llega á las mismas conclusiones. Muy recientemente, Stoklasa (1911), estudiando los productos fosfoorgánicos contenidos en la tierra, ha hecho ver que son substancias procedentes de la vida microbiana *(fosfatidas)*. Ciertos microbios, gracias á las secreciones ácidas que dejan (ácidos fórmico, acético, butírico), disuelven los fosfatos minerales.

Una parte de estas disoluciones sirve de alimento para nuevas generaciones de microbios que las transforman en lecitinas y nucleínas; otra parte es utilizada por la planta. Resulta de esto que, independientemente de la acción precisa que ejerce el gas carbónico sobre los fosfatos, debe tenerse en cuenta, como fuente importante de disoluciones fosfatadas, la presencia en el suelo de los ácidos elaborados por fermentación microbiana. El aumento del número de las bacterias, imputable á menudo á la aplicación de abonos orgánicos, parece estar en relación directa con la asimilabilidad del ácido fosfórico.

B. **Sílice, cloro, ácido sulfúrico.**—En todas las disoluciones del suelo existe cierta proporción de *sílice libre*. En efecto, después de la evaporación á sequedad de un agua que ha lavado la tierra y del tratamiento del residuo por un ácido diluído, queda siempre una capa amorfa, más ó menos considerable, que no desaparece más que por un tratamiento con ácido fluorhídrico. La forma que afecta la sílice en estas soluciones es la forma coloide. No es probablemente en estado de hidrato silícico definido que esta sílice circula en las aguas telúricas, sino en estado de suspensión. Tal vez, á pesar de su estado físico particular que la distingue de los cuerpos disueltos propiamente dichos, esta sílice seudodisuelta se renueva á medida que es absorbida por las plantas. Existen, en efecto, muchos vegetales que son capaces de acumular cantidades considerables de este elemento, entre otros las gramíneas.

No se sabe nada respecto de esta *selección particular* de la sílice de parte de ciertos vegetales, y es bastante difícil concebir cómo penetra en la planta una substancia en seudosolución.

El *cloro* ó, mejor, los *cloruros*, circulan fácilmente en las aguas del suelo y no son retenidos por el poder absorbente (cloruros de sodio, de calcio). Atraviesan la tierra sin sufrir descomposición. Cuando las aguas de lluvia no son bastante abundantes para desalojar á los cloruros de los terrenos salados, estos cloruros pueden acumularse y perjudicar á la vegetación, que destruyen á la larga. El cloruro sódico es

absorbido en solución muy diluída por cierto número de plantas (vegetales que viven cerca del mar, patatas, remolacha, etc.); el papel que desempeña desde el punto de vista fisiológico es desconocido.

El cloruro cálcico no es un producto natural. Se forma por efecto de fenómenos complejos de que hablaremos á propósito del *poder absorbente*, cuando un suelo recibe, por ejemplo, cloruro potásico en forma de abono. Solamente la potasa es retenida, el cloruro se elimina en forma de cloruro cálcico cuando, como se comprende, este suelo contiene calcáreo.

En resumen, el cloro es un elemento muy móvil que los lavados prolongados pueden eliminar casi en su totalidad. No parece existir en ninguna de las moléculas orgánicas que constituyen los tejidos vegetales.

El *ácido sulfúrico* es también muy móvil en el suelo. Se le encuentra principalmente en forma de sulfato cálcico. Á pesar de su escasa solubilidad (1 parte en 400 de agua), puede ser arrastrado totalmente por las aguas de riego ó pluviales. La solubilidad del yeso es mayor en presencia de ciertas sales (cloruros sódico y magnésico, sulfato sódico, nitrato amónico). Pero, al revés del cloro, el ácido sulfúrico desempeña respecto del vegetal un papel muy importante, porque el azufre forma parte integrante de ciertos núcleos definidos que contiene la molécula albuminoide. Además, cierta cantidad de azufre se halla momentáneamente inmovilizada en estado insoluble en el suelo en forma orgánica, restos de las vegetaciones anteriores: el humus, en efecto, contiene siempre algo de azufre. Sólo á consecuencia de un trabajo químico, y principalmente microbiano, se oxida la molécula orgánica del azufre, pasando éste al estado de sulfato.

Si el sulfato cálcico, y el sulfato sódico, más raro, son muy móviles en las aguas del suelo, no ocurre lo mismo con el sulfato potásico empleado á menudo como abono. Aun cuando un lavado prolongado pueda separar la mayor parte, lo que ocurre es que, por efecto de una doble descomposición, el potasio se fija en las partículas térreas, y el ácido sulfúrico, uniéndose con la cal del calcáreo, desaparece con los lavados en forma de sulfato cálcico.

En resumen, los elementos ácidos que acabamos de estudiar tienen una movilidad muy diferente en el suelo: su eliminación por las aguas de lavado se efectúa en forma de cloruros de sodio y de calcio y de sulfato de calcio.

C. Potasa.—Hemos visto (pág. 226) que esta base no existía más que en muy pequeña cantidad en las disoluciones del suelo obtenidas por desalojamiento. Sin embargo, existen muchos vegetales que la extraen del suelo en proporciones muy considerables, aun cuando no se les suministren abonos potásicos solubles. Schlœsing hijo ha puesto de manifiesto, respecto de las disoluciones potásicas que contiene la tierra de labor, hechos análogos á los que hemos estudiado algunas páginas antes relativamente al ácido fosfórico. Si estas disoluciones son muy pobres, en cambio se renuevan de una manera continua á medida que son absorbidas por las plantas. Éstas pueden, en efecto, apoderarse de la potasa disuelta en una masa considerable de agua: se ha hecho el ensayo con el *maíz* de una manera del todo semejante al ensayo que dió resultados tan precisos respecto del ácido fosfórico. Este agotamiento de las soluciones naturales por el suelo, así como su constante renovación, han sido también estudiados en estos últimos años por Milton Witney.

¿Cuáles son los elementos de las rocas que ceden así su potasa al agua del suelo? Entre la gran variedad de minerales potásicos que contiene el suelo, hay algunos que ceden esta base con facilidad. Ssamojlov ha demostrado que, si se dan al *Aspergillus niger* todos los elementos minerales que reclama, menos la potasa, y se introduce ésta en el líquido en forma de ortoclasa, microclina, muscovita ó biotita, estando estos minerales finamente pulverizados, la mucedínea se desarrolla mucho mejor en contacto con los dos últimos minerales que en presencia de los dos primeros. Experimentos análogos, hechos con algunas plantas superiores, permiten afirmar que la rapidez con que ciertos minerales potásicos se desmoronan y se caolinizan, ejerce una marcada influencia en la manera como estos minerales ceden su potasa á los vegetales. Esta base parece separarse bastante fácilmente de los silicatos zeolíticos.

Observaciones sobre los estados de la potasa en el suelo.— Como la potasa desempeña en los vegetales un papel de primer orden, conviene entrar en algunos pormenores sobre la manera como se comportan las complicadas formas de este álcali contenidas en el suelo respecto de cantidades crecientes de agua. Estudiaremos más adelante los efectos obtenidos en la tierra vegetal con el empleo de reactivos más ó menos enérgicos pero extraños al suelo normal.

Examinemos, pues, la acción del *agua pura* sobre un peso limitado de tierra, agua empleada en gran exceso con relación á la cantidad de este líquido que podrían proporcionar las lluvias de un año entero en nuestro clima. He aquí un experimento sobre este asunto. En un gran vaso de gres, provisto de agujeros en su parte inferior, se ponen 50 kilos de tierra vegetal (supuesta seca) que contienen, en este momento, 5 kilogramos de agua. Esta tierra contenía, por kilogramo de materia seca, 8,92 gr. *de potasa total,* calculada en K^2O. La tierra ocupaba una superficie de 1520 centímetros cuadrados y tenía una altura de unos 50 centímetros. Se lixivió esta tierra con 50 litros de agua, añadidos sucesivamente, lo que corresponde á una capa de agua total de 33 centímetros. La cantidad de potasa en el líquido escurrido no fué más que 0,0029 gr. por kilogramo de tierra, ó sea $\frac{1}{3000}$ aproximadamente de la potasa *total.* Resulta de este ensayo que las aguas de lluvia no son capaces de quitar al suelo más que cantidades insignificantes de potasa. Si se examina más detenidamente la influencia del agua determinando su riqueza en potasa en las cantidades de líquido sucesivamente recogidas, se encuentra que la eliminación del álcali crece con la proporción del agua proporcialmente al principio; esta eliminación disminuye luego progresivamente. Así, la cantidad total de potasa que el agua puede quitar inmediatamente á la tierra parece tender á un límite, suponiendo, sin embargo, que se hagan los tratamientos en un corto espacio de tiempo He aquí, respecto de esto, cifras que se refieren á la tierra de que se acaba de tratar: 200 gr. de esta tierra se deslíen en un litro de agua destilada; al cabo de veinticuatro horas de contacto, se decanta y se repite el mismo tratamiento. Para una cantidad *décuple* de la del ensayo anterior, se han disuelto 0,0365 gr. de K^2O por kilogramo de tierra, ó sea, á poca diferencia, diez veces más de potasa que en el primer caso. La proporcionalidad antes señalada es, pues, aquí evidente; pero cesa cuando se aumenta la proporción de agua añadida. En efecto, si se toman 100 gr. de la misma tierra y se tratan con un litro de agua destilada, se obtiene para un kilogramo de tierra seca, 0,0670 gramos de H^2O, ó sea una cifra aproximadamente doble de la precedente, habiendo doblado la relación del agua á la tierra. La adición de un litro de agua al residuo, no da ya, para un kilogramo de tierra seca, más que 0,0490 gr. de K^2O; un nuevo litro solamente 0,027 gr.; ó sea en conjunto 0,143 gr. El cálculo enseña

que una cantidad indefinida de agua, actuando en un espacio de tiempo limitado á algunos días, tendería á quitar á la tierra una cantidad de potasa inferior á 0,200 gr., ó sea $^1/_{45}$ de la potasa total (8,92 gr.) contenida en un kilogramo de esta tierra. Apenas es necesario hacer notar que éstas son condiciones de lavado que nunca se presentan en las circunstancias naturales, ó que, á lo menos, exigirían un gran número de años. Resulta, pues, que normalmente y en contacto con las cantidades de agua que de ordinario recibe una tierra en el campo, la riqueza de las soluciones de potasa es extremadamente pequeña. La potasa se halla, pues, retenida en la tierra de labor casi en totalidad, en compuestos insolubles, ya minerales (silicatos), ya orgánicos (humatos) [Berthelot y André, 1887].

Fáltanos ahora examinar cómo se comporta la tierra respecto del agua adicionada de gas carbónico ó de ciertas substancias neutras, parecidas á las que se encuentran en el suelo.

Acción del gas carbónico en la solubilización de la potasa.— Por un litro de agua que contiene 100 gramos de la misma tierra que ha servido en los ensayos precedentes, se hace pasar durante hora y media una corriente de gas carbónico, agitando con frecuencia. Por kilogramo de tierra se disuelven 0,121 gr. de K^2O, ó sea una cifra doble de la que da el agua pura. El mismo ensayo, repetido con el residuo, dió 0,077 gr. de K^2O, ó sea, en conjunto, 0,198 de K^2O. La cantidad de potasa soluble aumenta, pues, por la influencia del gas carbónico; es aproximadamente doble de la cantidad que el agua pura ha extraído en las mismas condiciones de tiempo y de volumen de tierra empleado. Este es un punto que merece atención, porque, en las circunstancias naturales, el agua del suelo y las aguas de infiltración están siempre más ó menos cargadas de gas carbónico.

Añadamos aún algunas palabras relativas á la acción disolvente que ejercen ciertos compuestos neutros ó alcalinos respecto de las rocas potásicas.

Los hidratos de carbono solubles, y especialmente el azúcar de caña, en solución diluída, disuelven una cantidad de potasa superior á la que toma el agua pura; la presencia de ciertas amidas en el agua, tales como la acetamida, da un resultado análogo; en cambio, el agua débilmente amoniacal parece comportarse como el agua pura.

En resumen, la potasa es un *elemento muy poco soluble* en la forma que reviste en el suelo. Repetiremos aquí lo que hemos dicho á propósito del ácido fosfórico: las soluciones de este álcali son extremadamente diluídas; si se renuevan de una manera incesante, á medida que son utilizadas por las

plantas, parecen poder bastar, en general, á la nutrición vegetal. Pero no debe olvidarse que el análisis de las cenizas vegetales indica siempre una proporción de potasa superior á la del ácido fosfórico; ciertas plantas son, respecto de este álcali, muy exigentes; de ahí la necesidad, en que se ve muy á menudo el agricultor, de añadir al suelo sales de potasa solubles en forma de abonos. Veremos, por otra parte, que éstos, en las dosis ordinariamente empleadas, son retenidos en virtud de propiedades especiales comprendidas bajo el nombre de ***poder absorbente***.

D. Sosa. — Esta base es, generalmente, menos abundante que la potasa en las rocas que forman la tierra de labor. Sin embargo, las aguas de lavado de las tierras arrastran cantidades de ella que, generalmente, sobrepujan á las de potasa. Se debe esto á que los suelos contienen frecuentemente sal marina, sal muy difusible; además, cuando estos suelos reciben nitrato sódico, éste, muy móvil, no es retenido y pasa fácilmente á las aguas de lavado. Hay que observar también, que la sosa, al revés de la potasa, no parece ser indispensable para el desarrollo de la mayor parte de los vegetales. Hasta existen muchas plantas que no contienen sosa, y por esto puede preguntarse si, cuando la planta es relativamente rica en esta base, la ha absorbido en virtud de un *fenómeno de substitución;* ya que la sosa es tan capaz de unirse con los ácidos orgánicos como la potasa. Sería posible que, en el caso de suelos relativamente pobres en potasa, interviniera en parte la sosa para desempeñar el papel secundario que acabamos de mencionar. Pero su función fisiológica es casi desconocida. La sosa debe, pues, eliminarse más fácilmente de un suelo plantado, porque es inutilizada por numerosos vegetales. Además, esta base es menos bien retenida que la potasa, por las propiedades absorbentes de las tierras. La sosa que entra en la constitución de muchas rocas debe ofrecer á la acción del agua un grado de resistencia próximo al de la potasa; pero, la circulación de la sosa en el suelo ha sido poco estudiada y, por otra parte, presenta menos interés.

E. Cal, magnesia. — Estas dos bases, en forma de silicatos complejos, así como en estado de carbonatos en un gran número de tierras de labor, suministran soluciones que son tanto más ricas cuanto más cargados de ácido carbónico están los líquidos del suelo.

La *solubilidad del carbonato cálcico en el agua pura* ha dado cifras que varían según los autores. Según Schlœsing, un litro de agua á 16° disolvería 0,0131 gramos de CO^3Ca, ó sea, 1 gramo en 76 litros, ó 76000 gramos de agua. Bineau ha indicado la cifra de 50000 gramos de agua; Hollemann, 99500 gramos de agua á unos 8° y 80040 gramos de agua á 23°. Sea lo que quiera, el carbonato cálcico es muy poco soluble en el agua sola, pero su solubilidad aumenta notablemente en presencia del gas carbónico, como lo demuestra la siguiente tabla:

Presión de CO^2 en centímetros de mercurio	CO^3Ca disuelto en un litro	
0,05	0,0746 gr.	(Schlœsing).
0,08	0,0850 »	
0,33	0,1372 »	
1,38	0,2231 »	
5,00	0,3600 »	
25,30	0,6634 »	
55,30	0,8855 »	
72,90	0,9720 »	
1 atmósfera	1,0790 »	(Engel).
2 atmósferas	1,4030 »	

La solubilidad del carbonato cálcico aumenta en presencia de sales amoniacales; disminuye en contacto con sales alcalinas.

El *carbonato magnésico* es poco soluble en el agua pura. Su solubilidad, sin embargo, es mucho mayor que la del carbonato cálcico; es de 0,97 gramos por litro. La presencia del gas carbónico aumenta esta solubilidad en proporciones muy notables; á la presión ordinaria, un litro de agua cargado de este gas disuelve 28,45 gramos de carbonato neutro á 13°. Esta solubilidad disminuye mucho cuando se eleva la temperatura.

Resulta de estas cifras que las aguas que circulan en el suelo contienen siempre en disolución carbonato cálcico y carbonato magnésico. Estas disoluciones son tanto más cargadas cuanto más elevada es la riqueza del agua en gas carbónico y cuanto más baja es la temperatura. Así se explica el por qué las aguas de loción de un suelo calcáreo contienen siempre una cierta proporción de estos carbonatos: cuando se evapora su disolución, los carbonatos se precipitan. De estas disoluciones carbónicas, de concentración variable con la riqueza

del suelo en gas carbónico, toman los vegetales la cal y la magnesia que necesitan. Pero no se conoce la razón por la cual la cal siempre es más abundante en toda la planta que la magnesia, por más que esta última base, en verdad más escasa en el suelo, es, sin embargo, mucho más soluble en el agua cargada de gas carbónico que la cal. Tampoco puede explicarse por qué ciertas categorías de plantas acumulan enormes proporciones de sales cálcicas, mientras que otras, en idénticos terrenos, no toman más que pequeñas cantidades de esta base. Es posible que los vegetales que absorben mucha cal no se apoderen de esta substancia más que como *un medio de defensa* contra los ácidos que ellos elaboran en cantidad á veces muy notable. Se podrían citar, respecto de esto, muchos ejemplos comprobantes.

Tal es la constitución de lo que puede designarse con el nombre de *disoluciones normales del suelo*. Después de haber definido este poder disolvente del agua, examinemos en pocas líneas los fenómenos de *doble descomposición* que ocurren generalmente en el seno de la tierra de labor, ya sea cuando los elementos naturales reaccionan entre sí, ya sea cuando estos elementos naturales se ponen en contacto con las sales añadidas como abono. Esto es un complemento indispensable al estudio de las disoluciones propiamente dichas.

III

FENÓMENOS DE DOBLE DESCOMPOSICIÓN

Estos fenómenos son de extremada importancia, porque, gracias á su actividad, el suelo no permanece nunca inmóvil en su composición. Las metamorfosis producidas por doble descomposición intervienen de una manera esencial en la formación de productos solubles utilizables por las plantas. Estudiemos algunas de estas reacciones.

A. Fosfatos.—Debe citarse, en primer lugar, la doble descomposición, muy frecuente, que experimenta el fosfato tricálcico en contacto con los elementos férricos y alumínicos del suelo. Si se añade al suelo cierta cantidad de fosfato tricálcico, parece que las soluciones naturales de este suelo deberían enriquecerse en ácido fosfórico á consecuencia de esta adición. Sin embargo, sabemos, por los hechos

dados á conocer por Schlœsing hijo, que cada suelo posee una suerte de *coeficiente propio de solubilidad* respecto del ácido fosfórico, cuyo efecto es tal que, si este ácido tiende á desaparecer á causa de la absorción vegetal, reaparece una nueva cantidad de este ácido igual á la del líquido antes absorbido. Inversamente, cuando la proporción del ácido soluble aumenta más allá de cierto límite, se manifiesta una insolubilización parcial que vuelve el líquido á su composición primitiva. Es muy probable que esta constancia en la concentración sea atribuíble á acciones de doble descomposición que experimenta el ácido fosfórico. Dehérain cita el caso de tierras, á las que se había añadido negro animal como abono, en las cuales el ácido fosfórico no se manifestaba ya en sus reacciones ordinarias como fosfato tricálcico. En efecto, tratadas por el ácido acético que disuelve los fosfatos cálcico y magnésico y no ataca á los fosfatos de hierro y de aluminio, estas tierras no daban ya las reacciones del ácido fosfórico. Es evidente que este ácido se había unido, por doble descomposición, á la alúmina y al óxido férrico. No se puede dar aquí la culpa á la acción del bicarbonato cálcico, cuya presencia, como hemos dicho anteriormente (pág. 60), disminuye notablemente la solubilidad del fosfato tricálcico en el agua cargada de gas carbónico. La presencia del bicarbonato cálcico no habría ejercido influencia alguna respecto del ácido acético.

El ácido acético, unido á la alúmina y al óxido férrico, ¿es inerte respecto de los vegetales? Pronto veremos que es probable que las plantas toman primero su ácido fosfórico de los fosfatos alcalinotérreos (de los humofosfatos, según Pouget y Chouchak), sin que los fosfatos de hierro y de aluminio, menos atacables, sean inutilizables en esta forma. Además, como ha hecho observar Dehérain, los carbonatos alcalinos (potásico, amónico) que existen naturalmente en los suelos ó introducidos en ellos con el empleo de los abonos, son capaces, por contacto prolongado, de atacar á estos últimos fosfatos y de movilizar nuevamente al ácido fosfórico. Se trata aquí de *fenómenos de equilibrio* entre el ácido fosfórico y las diferentes bases alcalinotérreas ó alúminoférricas: por efecto del juego de ciertas reacciones ó de la misma composición del suelo, el ácido fosfórico toma una forma insoluble y parece inatacable por los vegetales; pero intervienen entonces nuevos elementos (carbonatos alcalinos) que solubilizan los fosfatos que una primera serie de reacciones había inmovilizado. Añadamos también que las soluciones, aun muy diluídas, de carbonato potásico disuelven notables cantidades de fosfato tricálcico. Agitando en un frasco una pequeña cantidad de esta última sal con una solución muy diluída del carbonato alcalino, se puede fácilmente demostrar en el líquido filtrado la presencia del ácido fosfórico, que está unida con el potasio. Por consiguiente, es posible que este carbonato constituya el disolvente natural del fosfato cálcico y que, á lo menos en ciertos casos, la formación de las soluciones fosfatadas sea correlativa de la formación del mismo carbonato potá-

sico. Según algunos autores, una de las ventajas del encalado consistiría en la solubilización del ácido fosfórico de los fosfatos de hierro y de aluminio por efecto de la substitución de estas bases por la cal. Debe notarse también que una adición de sulfato amónico al suelo, en forma de abono, favorece la disolución del fosfato tricálcico.

Los superfosfatos, empleados como abono, representan, en el momento de su aplicación, una forma del ácido fosfórico muy soluble en el agua. En los suelos calcáreos, su *retrogradación,* esto es, su transformación en fosfato tricálcico, es rápida, pero es probable que se transformen igualmente, de un modo parcial, en fosfatos de hierro y de aluminio. Notemos de paso que una solución diluída de fosfato monocálcico no precipita en contacto con una solución de bicarbonato cálcico, pero si se calienta el líquido á unos 50° solamente, se precipita fosfato tricálcico.

Resulta de recientes experimentos, debidos á Müntz y Gaudechon (1912), que los superfosfatos, aplicados antes de una rotación trienal de cosechas, aun á dosis masivas, disminuyen rápidamente de actividad. Desde el segundo año, la influencia bienhechora de esta forma de ácido fosfórico se atenúa sensiblemente: de manera que, al tercer año, «*las plantas no hacen ya distinción alguna entre el fósforo procedente de las diversas formas de abonos fosfatados y el que preexiste naturalmente en el suelo*». Esta inercia relativa del fósforo debe ser atribuída á las transformaciones que ha experimentado en el suelo.

En resumen, los estados que presenta en el suelo el ácido fosfórico deben ser múltiples, porque si, á causa de los fenómenos de doble descomposición y de equilibrio, se produce una forma en la cual el ácido fosfórico sea relativamente estable, intervienen ciertas reacciones para cambiar el sentido del equilibrio y hacer al ácido fosfórico más ó menos soluble que primitivamente. Debe también tenerse en cuenta la desaparición de este ácido á causa de los vegetales que lo absorben. Pronto buscaremos cómo puede intentarse definir las formas fosfóricas del suelo mediante el empleo de disolventes más enérgicos que el agua.

B. **Sales potásicas.**—Los fenómenos de doble descomposición en que participan las sales potásicas, en un suelo que no ha recibido abonos, son bastante difíciles de definir. Vere-

mos con qué energía la tierra retiene la potasa, aun cuando se le adicionen sales potásicas solubles.

Las dobles descomposiciones resultan evidentes en el caso del empleo del nitrato sódico como abono. El ácido nítrico de esta sal pasa á la planta, en parte en la forma primitiva y en parte en forma de nitratos potásico y cálcico. Las aguas de loción del suelo contienen proporciones de sales sódicas (sulfato, cloruro) tanto mayores cuanto mayores son las proporciones de nitrato sódico empleadas. Cuando se incorpora nitrato potásico á una muestra de tierra de labor y, después de haber dejado la masa en reposo durante algún tiempo, se la lava para extraer los elementos solubles, se encuentra sobre todo nitrato cálcico en las aguas de loción. Hay, pues, en estos dos casos, cambio de bases: efectivamente, no se puede admitir que la planta absorba únicamente nitrato sódico, porque en los vegetales que almacenan fácilmente grandes proporciones de nitratos (remolachas, borrajas, amarantos, maíz) se puede extraer de los zumos de estas plantas principalmente nitrato potásico. Debería suponerse que la planta, después de haber absorbido el nitrato sódico, expulsaba la sosa en una forma desconocida. Este es un problema muy delicado que se relaciona con la excreción de parte de las raíces de ciertas substancias solubles, problema en que no podemos ocuparnos aquí.

En el caso del nitrato potásico adicionado á un suelo no plantado, hay realmente doble descomposición: lo cual hace resaltar una vez más una curiosa propiedad, que examinaremos ulteriormente: ésta es la absorción *electiva* que ejercen sobre el potasio algunos elementos de la tierra de labor.

Tales son, resumidos muy sumariamente, los fenómenos de doble descomposición más importantes que se observan en la tierra de labor. Lo que complica siempre el mecanismo de las dobles descomposiciones, es la presencia de la materia húmica. Á propósito del estudio del poder absorbente, veremos en qué sentido se producen ciertas reacciones cuando este factor orgánico entra en acción.

Constitución de las soluciones diluídas.—Para comprender la especial actividad de las disoluciones que circulan en el suelo, y cuyo grado de disolución es considerable, es preciso recordar que la mayoría de estas soluciones son *electrolitos* que, como tales, están disociados en sus *iones*. Esta disociación es tanto más completa cuanto mayor es la dilución; si la dilución fuese infinita, la disociación sería total

(véase nuestra *Química vegetal)*. Sabido es que las reacciones químicas que se efectúan entre sal y sal, entre base y ácido, entre ácido y sal, entre base y sal, *no son más que reacciones de iones*. Sólo los iones libres toman parte en una reacción química y se deduce de esto que estas reacciones serán tanto más completas cuando se efectúen en presencia de mayor número de iones libres: lo que implica á veces la existencia de un grado de disolución muy pronunciada. Es fácil comprender, según esto, la *movilidad* de los elementos salinos disueltos en los líquidos del suelo y el número considerable de fenómenos que deben originar.

Según Stoklasa (1911), los microorganismos del suelo absorberían los iones aislados, y, cuando se exalta la vitalidad de estos seres, ó cuando se aumenta su número por inoculación, las substancias nutritivas del suelo son movilizadas y asimiladas con mayor facilidad por las raíces de las plantas. Éstas no absorberían, pues, más que soluciones fuertemente ionizadas, lo que ciertamente facilitaría el juego de las reacciones íntimas que se efectúan en toda célula viviente.

IV

DIÁLISIS DE LA TIERRA DE LABOR

Cuando se lava con agua destilada una tierra cualquiera, el líquido que escurre contiene, como sabemos, substancias minerales. Pero, este líquido tiene siempre un color más ó menos amarillo. La materia *orgánica* acompaña, pues, á la materia mineral hasta en las soluciones más diluidas. ¿Se pueden separar estas dos substancias? Los hechos siguientes podrán ilustrarnos sobre este punto.

Grandeau (1872), estudiando la notable fertilidad *de las tierras negras de Rusia*, creyó que estas tierras contenían combinaciones especiales de la materia orgánica con el ácido fosfórico, la cal, etc. Estas combinaciones son muy estables, el agua sola no actúa sobre ellas. Si, después de haber des-

truído el calcáreo, por adición de un ácido, se lixivian estas tierras negras con amoníaco diluído, se obtiene un líquido muy pardo, en el cual están enmascaradas, respecto de los agentes que ordinariamente sirven para reconocer su presencia, las reacciones de las substancias minerales que el amoníaco ha disuelto. Evaporado á sequedad, y luego calcinado, este líquido da un residuo fijo, bastante rico en ácido fosfórico, cal, magnesia, potasa, etc. Se puede emplear, desde el principio, para la lixiviación de la tierra, una solución de carbonato amónico, que desempeña á la vez el papel de ácido y el de base: es, pues, probable, según esto, que este carbonato, cuya existencia en todas las tierras demostraremos más adelante, *sea el verdadero agente natural de la disolución de las materias minerales*, indispensables para la nutrición vegetal.

Esta solución orgánica de los elementos minerales, se comporta en la diálisis de una manera notable. Si se vierte en la membrana de un dializador inmergido en agua destilada, cede al agua la mayor parte de las substancias minerales que contiene; pero, el dializador no deja pasar la materia orgánica. Grandeau deduce de esto que la materia orgánica del suelo es el vehículo de los alimentos minerales utilizados por las plantas, y que la fertilidad de un suelo está ligada con la riqueza en materia mineral de las substancias solubles en el amoníaco. Así, pues, el disolvente, sino único, á lo menos el más importante de los fosfatos, de las sales de cal, de potasa, etc., sería un *disolvente orgánico;* éste no penetraría en la raíz (cuya membrana exterior debe ser análoga á la del dializador); la planta no tomaría de las disoluciones más que los elementos fijos.

Esta manera seductora de interpretar el origen, la naturaleza y el papel de las disoluciones del suelo, no está exenta de objeciones, y, en realidad, aun cuando se pueda en cierto modo atribuir á las materias húmicas la facultad de disolver las substancias minerales útiles á las plantas, estas materias húmicas, en el estado en que han sido extraídas del suelo por el amoníaco, no se hallan evidentemente ya en la forma natural que realmente tenían en la tierra de labor.

Si, como ha dicho Pétermann, se ponen directamente en la membrana del dializador, y sin que hayan sufrido preparación previa, tierras de origen geológico muy diferente, pasan al agua destilada substancias minerales como PO^4H^3, CaO, K^2O, etc.; pero, el agua toma siempre un *tinte amarillo*, prueba de la presencia de materia orgánica. Si se evapora á sequedad el líquido y se calcina, hay ennegrecimiento de la masa y desprendimiento de olor á quemado.

Se tuvo en cuenta en estos experimentos la pequeña cantidad de materia orgánica que cede al agua destilada la membrana de pergamino del dializador.

Así, la diálisis de la tierra de labor, tomada en su estado natural, cede al medio exterior las materias minerales indispensables á los vegetales, pero estas últimas van acompañadas de una cantidad variable, á veces bastante notable, de una substancia orgánica. En presencia de este hecho, algunos autores han formulado la siguiente conclusión. Al mismo tiempo que la raíz se apodera de las substancias minerales del suelo, absorbe simultáneamente esta materia orgánica tan difusible que se escapa del dializador, y asimila su carbono. Esta opinión es perfectamente aceptable respecto de ciertos vegetales superiores, aun cuando estén dotados de clorofila; en cuanto á los vegetales desprovistos de ella, es preciso evidentemente invocar un modo semejante de absorción del carbono (y del nitrógeno que le acompaña) para explicar su nutrición orgánica. Volveremos á este punto en el capítulo siguiente, á propósito del papel que desempeña la materia orgánica en la nutrición vegetal. (Consúltese también sobre este tema nuestra *Química vegetal.)*

De los hechos que acaban de ser expuestos, fijémonos en la noción importante de que, entre los disolventes *naturales* de las substancias minerales, se pueden contar ciertas materias orgánicas contenidas en el suelo. He aquí, como información, respecto de 100 gramos de tierra, las cantidades de materias orgánica y mineral que han atravesado el dializador al cabo de diez dias (Pétermann).

	Tierra calcáreoesquistosa	Tirra arenoarcillosa
Materia orgánica	0,0660 gr.	0,1811 gr.
Cal.	0,0561 »	0,0444 »
Magnesia	0,0049 »	
Potasa	0,0215 »	0,0126 »
Sílice	0,0156 »	0,0228 »
Acido fosfórico	0,0008 »	0,020 »
	0,1649 »	0,2629 »

V

DIFERENTES FORMAS DE LA MATERIA MINERAL DEFINIDAS SEGÚN LA ACCIÓN DE ALGUNOS REACTIVOS ENÉRGICOS

Hemos estudiado, en las páginas precedentes, las disoluciones *normales* del suelo y hemos visto cuáles eran los agentes que engendraban estas disoluciones.

A fin de evaluar, ya sea la totalidad de los elementos de fertilidad que contiene una tierra dada, ya sólo, lo que es mucho más importante, la fracción de estos elementos que se supone existir en una forma inmediatamente asimilable por el vegetal, frecuentemente se ha acudido á reactivos muchísimo más enérgicos que los disolventes naturales: agua y gas carbónico. En la mayor parte de los métodos usuales de análisis químico, aplicado á la tierra de labor, se emplean precisamente ciertos reactivos enérgicos (ácidos minerales en particular), en condiciones de tiempo, temperatura y concentración determinadas.

Nos ocuparemos más adelante en los métodos de este análisis: pero, como consecuencia de la constitución de los suelos, por una parte, y como introducción al estudio de los métodos preconizados para la determinación de los elementos de fertilidad, por otra, vamos á ver cuáles son las indicaciones que se pueden deducir — á propósito de la naturaleza y del estado de ciertos elementos minerales — de la acción de los reactivos de que acabamos de hablar. Los trabajos publicados sobre esta materia son extremadamente numerosos: no citaremos más que los hechos siguientes, que fijarán lo bastante la opinión sobre esta materia. Emplearemos la *tierra natural*, que contiene á la vez elementos minerales cuyo peso es casi siempre preponderante y elementos orgánicos; éstos reaccionan de un modo profundo sobre los pri-

meros. Suponemos que la tierra no ha recibido nunca abonos.

A. Fósforo y ácido fosfórico. — El ácido fosfórico que se encuentra en las disoluciones muy diluídas del suelo antes examinado, y que parece ser la fuente principal de su alimentación fosforada, no es la única forma del fósforo contenido en la tierra de labor. No considerando las cosas más que del modo más simple, se puede admitir que estas formas son dos. Dada la presencia casi constante del humus en las tieras más variadas, se puede creer, *a priori*, que los restos vegetales que constituyen el origen de este humus contienen una parte, á lo menos, de un fósforo en una forma todavía *orgánica*, esto es, incompletamente oxidada. Esto es lo que enseña la experiencia.

En efecto; calentemos un peso conocido de tierra en un tubo atravesado por una corriente de oxígeno, y dirijamos los gases de la combustión á una larga columna de carbonato sódico seco, calentado también al rojo. Después de su enfriamiento, tratemos el contenido del tubo, tierra y carbonato sódico. por ácido nítrico, filtremos y determinemos el ácido fosfórico por los métodos usuales. La cifra que nos dará esta determinación será siempre mayor que la que se obtendría tratando el mismo peso de tierra, en caliente y por prolongada digestión, por un ácido concentrado, por ejemplo, el nítrico. Esto nos demuestra que una *fracción* del fósforo total de la tierra existe en forma orgánica, insoluble en los ácidos, aun concentrados; en todo caso, muy lentamente transformable con su contacto en ácido fosfórico. La incineración de la tierra en contacto con el aire, provoca la oxidación de la mayor parte de este fósforo orgánico, pero así también se está expuesto á pérdidas bastante serias. En efecto, el carbonato, por una parte, la sílice, por otra, descomponen los fosfatos con volatilización del fósforo en proporción desconocida. Lo mismo ocurre, *a fortiori*, cuando se incineran plantas secas.

Los suelos ricos en humus contienen una cantidad á menudo muy notable de fósforo orgánico, según se deduce de numerosos análisis. Schmöger (1893) ha demostrado que este fósforo formaba parte de una *nucleína*. Si, en efecto, se calienta en la autoclave durante diez horas á la temperatura de 140-150°, humus con un exceso de agua, se hidroliza el principio fosforado, que se vuelve soluble en el ácido clorhídrico diluído y frío.

Al lado de esta forma *orgánica*, se encuentra el fósforo en estado de ácido fosfórico unido á la cal, á la magnesia, al hierro, á la alúmina; soluble en todos los casos en los ácidos enérgicos en caliente y, á menudo, también en los ácidos diluídos y fríos cuando el suelo no contiene fosfatos cristalizados (apatito), menos fácilmente atacables. En este último estado, los agentes naturales disuelven poco el ácido fosfórico y parece que las plantas se apoderan de él con dificultad.

Como ejemplo de las diferentes formas de fósforo contenidas en la tierra de labor, citemos el caso de la siguiente muestra:

Ácido fosfórico *total* obtenido por calefacción en una corriente de oxígeno en presencia de carbonato sódico	2,92 gr. (1)
Ácido fosfórico disuelto en HCl diluído y frío . . .	1,09 gr.
Ácido fosfórico disuelto en HCl concentrado é hirviente	1,83 gr.

(Berthelot y André, 1887.)

En la misma masa del fósforo orgánico se podrían establecer muchas subdivisiones. El ácido fosfórico puede existir en estado de ácido fosfórico conjugado (humofosfatos), no poniéndose en libertad, en forma mineral, más que por efecto de una ebullición prolongada con ácidos ó álcalis diluídos. Pero este tratamiento no basta, generalmente, para oxidar completamente el fósforo orgánico: la combustión en el oxígeno, tal como hemos indicado, es el único medio que permite conseguir con seguridad el objeto propuesto.

Son, pues, á lo menos dos las formas en que se encuentra el fósforo en el suelo: se pueden definir estas formas mediante el empleo de los reactivos que acabamos de estudiar.

El fósforo orgánico, tan resistente á los reactivos ácidos, se oxida paulatinamente por la acción de los agentes microbianos. A medida que el carbono del humus desaparece por oxidación, el fósforo toma la forma de ácido fosfórico, pero con tanta más lentitud cuanto menos rica en cal sea la tierra.

Ácido fosfórico útil á los vegetales.—Mediante un sencillo experimento se puede definir cuál es, en un suelo determinado, la porción del ácido fosfórico en estado de fosfatos minerales á la que las plantas se dirigen de preferencia. Schlœsing hijo (1889) ha encontrado, en ciertos ácidos empleados en concentraciones variables pero siempre muy débiles, un reactivo que permite señalar la parte de los fosfatos fácilmente asimilables y la de los que lo son poco ó nada.

Para ello se trata una pequeña cantidad de tierra (10 á 20 gramos) por un litro de agua destilada que contiene un peso exactamente conocido de ácido nítrico (calculado en N^2O^5). Se agita mecánicamente la mezcla durante diez horas; luego se determina el ácido fosfórico disuelto y también la acidez final del líquido, la cual puede diferir mucho de la acidez inicial á causa de la disolución de la cal

(1) En un kilogramo de tierra seca.

del carbonato cálcico contenido en la muestra de tierra. Es posible que esta acidez final sea primero negativa. Se observa que, cuando el valor del ácido nítrico crece poco á poco á partir de cero, el ácido fosfórico disuelto crece al principio con bastante rapidez: permanece luego estacionario y después continúa creciendo. De manera que, si se trazan abscisas correspondientes á la riqueza del líquido en ácido nítrico y ordenadas que correspondan á las cantidades de ácido fosfórico disueltas, la curva resultante está primero fuertemente inclinada sobre el eje de las abscisas, después sigue paralela á él, y finalmente se eleva. Esta parte intermedia separa, pues, claramente el ácido fosfórico del suelo en dos porciones: una soluble en los líquidos de acidez muy débil (1 á 2 diezmilésimas de ácido nítrico), otra que no se disuelve más que cuando la acidez llega á 1 milésima. Si, además, se determina el hierro que se ha disuelto simultáneamente en el líquido ácido, se observa que no hay más que indicios en la primera parte del experimento; este metal aparece claramente en las aproximaciones de la parte intermedia y aumenta después de una manera sensible. Se deduce de esto que las primeras porciones de ácido fosfórico disueltas en los líquidos ácidos muy débiles deben estar unidas con bases alcalinas ó alcalinotérreas, potasa, cal y magnesia, y que los fosfatos que forman parte de las soluciones naturales y alimentan de preferencia las plantas son los fòsfatos de las bases precitadas, con exclusión, á lo menos parcial, de los fosfatos de hierro y de aluminio.

He aquí, como documento informativo, el cuadro de uno de los análisis:

Tierra silíceoarcillosa (20 gramos de tierra + 1040 gramos de agua)
(cifras expresadas en miligramos)

N^2O^5 añadido	Acidez final en N^2O^5	P^2O^5 disuelto en 1 litro	Fe^2O^3 disuelto en 1 litro
0	— 25,0	0,38	»
25	— 11,9	0,52	»
50	— 3,5	1,07	»
100	+ 9,9	1,66	»
200	+ 69,3	1,89	»
300	+ 148,5	1,97	»
400	+ 245	1,79	»
500	+ 334	1,92	»
1220	+ 1090	1,95	0,89
2220	+ 1990	3,89	4,32

Se ve, pues, todo el partido que puede sacarse de este procedimiento de ataque del suelo mediante ácidos muy diluídos cuando se quiere conocer la composición de los fosfatos más asimilables por el vegetal.

Recordemos que Pouget y Chouchak han admitido igualmente, á consecuencia de sus experimentos de lavado de tierras con agua, la presencia de dos formas de ácido fosfórico. La primera, la que estos autores consideran como la forma llamada *asimilable*, formaría parte de un núcleo orgánico (pág. 236).

En el ataque de las tierras se pueden emplear ácidos menos enérgicos que los ácidos fuertes. Con este objeto, Dyer (1894) ha propuesto el empleo del ácido cítrico, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: El zumo de las raíces es ácido y esta acidez parece debida á la presencia del ácido cítrico. Un término medio de la acidez del zumo de las raíces de un gran número de vegetales ha sido de 0,85 por 100.

Dyer considera que el ataque de la tierra por una solución fría de ácido cítrico al 1 por 100 se halla justificado, porque se emplea un agente de disolución, en cierto modo natural, si se admite que, por efecto de su contacto íntimo con los fragmentos de las rocas, las raíces disuelven directamente algunos componentes de éstas.

Las conclusiones á que ha llegado Dyer con el empleo del ácido cítrico son, en grandes líneas, las siguientes: Dada la riqueza total de un suelo en ácido fosfórico determinada con el empleo en caliente de ácidos fuertes, este suelo proporcionará tanto más ácido fosfórico á las plantas cuanto mayor sea la fracción del ácido total soluble en la solución cítrica.

El ácido acético ha sido encontrado á veces en la naturaleza en algunos suelos ricos en humus, procediendo probablemente de alguna fermentación. Mucho tiempo antes de las investigaciones que acabamos de exponer, Dehérain y Meyer (1879), después Dehérain y Kayser (1880), consideraban ya á este ácido como un disolvente natural de ciertos principios minerales del suelo y recomendaban su empleo (veinticuatro horas de contacto en frío, ó una hora á la ebullición) para definir el grado de asimilabilidad de los fosfatos. Estos autores han observado que toda tierra que no mejora con la adición de superfosfatos es una tierra en la cual la mayor parte del ácido fosfórico es soluble en el ácido acético y, por consiguiente, se halla en un estado aprovechable por las plantas de una manera rápida. Por el contrario, cuando una tierra no contiene más que proporciones mínimas ó nulas de ácido fosfórico soluble en el ácido acético, la adición de superfosfatos será ventajosa, aun en los casos en que la cantidad *total* del ácido fosfórico, determinada con los ácidos fuertes, dé una cifra elevada, de 1 gramo, por ejemplo, por kilogramo.

Los hechos que acabamos de exponer enseñan, pues, cómo se pueden definir, mediante reactivos apropiados, pero sólo

de un modo aproximado, la naturaleza de los fosfatos del suelo y su grado de asimilabilidad.

B. **Azufre y ácido sulfúrico.**—Los estados del azufre contenido en el suelo, como los del fósforo, son dos. El azufre *total*, comprendiendo en él el azufre de los sulfatos minerales y el azufre orgánico de la materia húmica, no puede ser evaluado con seguridad más que por combustión en contacto con el oxígeno y el carbonato sódico, del mismo modo que el fósforo. Así, se convierte todo el azufre orgánico en ácido sulfúrico. Después de enfriamiento, se trata el contenido del tubo con agua acidulada con ácido nítrico y se determina en el líquido el ácido sulfúrico por los métodos ordinarios. La oxidación total del azufre, obtenida proyectando en un crisol calentado al rojo una mezcla de tierra y de nitrato potásico, da á menudo resultados análogos á los de la combustión en una corriente de oxígeno, pero el empleo de este último procedimiento es menos seguro.

Una parte del azufre orgánico contenido en la tierra se encuentra en estado de compuestos *sulfoconjugados*, cuya presencia casi constante puede ponerse de manifiesto por ebullición prolongada de la tierra con un ácido ó un álcali diluídos. Sin embargo, es difícil saber exactamente qué parte corresponde á esta última forma, porque, como en el caso del fósforo, los ácidos diluídos, aun en caliente, disuelven á veces lentamente los sulfatos minerales del suelo ($CaSO^4$). Cuando se prolonga la ebullición, para asegurar la completa disolución de estos últimos, se corre el peligro de desdoblar los compuestos sulfoconjugados.

El *segundo estado* en que se encuentra el azufre en el suelo es el estado mineral. Algunos suelos contienen sulfuros (sulfuro de hierro entre otros), los cuales son atacados bastante difícilmente por los ácidos diluídos, pero lo son de un modo más completo por los ácidos concentrados. En cuanto al sulfato cálcico, se disuelve en suficiente cantidad de agua; más fácilmente si esta agua contiene ácido clorhídrico. Si se opera en frío, es necesario prolongar el contacto bastante tiempo y agitar á menudo la mezcla.

He aquí, respecto de este punto, los resultados obtenidos con una muestra de tierra. Cincuenta gramos de ésta fueron tratados con 5 veces su peso de ácido clorhídrico al centésimo durante veinticuatro horas en frío, y luego durante cuatro horas á la temperatura de la ebullición. Después de filtrar, lavar y precipitar con el cloruro bárico, se obtuvo (refiriendo la cantidad hallada á un kilogramo de tierra seca): azufre = 0,182 gramos. Esta cifra corresponde verosímilmente sólo al azufre de los sulfatos preexistentes. Una segunda muestra de la misma tierra, sometida á una ebullición de quince horas con el ácido nítrico dió (para un kilogramo de tierra): azufre = 0,212 gramos. Esta cifra, más elevada que la precedente, corresponde á la vez al azufre de los sulfatos preexistentes, al procedente de los sulfoconjugados y á una parte del azufre orgánico que el ácido nítrico ha oxidado. Pero, esta oxidación ha sido, á lo menos en este caso, poco enérgica, porque otra muestra de la misma tierra, tratada con oxígeno y carbonato sódico al rojo, dió (para un kilogramo de tierra): azufre = 1,411 gramos. Se ve, pues, qué dosis tan considerable de azufre orgánico contenía la tierra examinada (Berthelot y André).

Todas las tierras se comportan, en cuanto al valor aproximado de las cifras obtenidas, del mismo modo que la tierra cuyo análisis acabamos de citar.

Es, pues, posible, mediante la aplicación de los métodos precedentes, definir de un modo bastante exacto las diversas formas que afecta el azufre en la tierra de labor.

Repetiremos respecto del azufre orgánico, lo que hemos dicho á propósito del fósforo: los procesos de oxidación microbiana actúan lentamente, transformando este azufre orgánico en ácido sulfúrico.

C. **Potasa.** — Esta base, indispensable al organismo vegetal, existe en el suelo en los múltiples estados que hemos indicado anteriormente; principalmente está unida con la sílice en silicatos complejos. No existe ningún reactivo ácido que pueda disolver la totalidad de la potasa, cualquiera que sea la concentración y la temperatura que se empleen. Únicamente el ácido fluorhídrico, capaz de eliminar la sílice en la forma volátil de fluoruro de silicio, permite evaluar de una manera rigurosa la totalidad de este álcali.

Veamos cuáles son las informaciones que puede, no obs-

tante, suministrar la acción de los ácidos fuertes, diluídos ó no, fríos ó calientes, sobre una muestra de tierra, de la cual se habrá determinado previamente la potasa total con el ácido fluorhídrico, como término de comparación. Citaremos los ensayos siguientes, como informaciones, para demostrar la manifiesta incertidumbre á que conducen en la apreciación de la cantidad de potasa utilizable por los vegetales.

Hemos estudiado antes la acción de los disolventes naturales, agua y gas carbónico, sobre la tierra, y hemos expuesto la proporción de álcali que estos reactivos podían extraer de un suelo determinado (pág. 241: *Observaciones sobre los estados de la potasa en el suelo*). Sobre la misma tierra arcillosilícea se han hecho las experiencias que siguen. Recordaremos que contiene 8,192 gr. de potasa total por kilogramo de tierra seca y pasada por el tamiz de 1 milímetro.

α. Acción del ácido acético.—Cincuenta gramos de tierra, mezclados con 200 gramos de agua adicionada de 4 gramos de ácido acético, han cedido, al cabo de hora y media de contacto en frío, 0,200 gr. de K^2O por kilogramo de tierra seca; el residuo, tratado por la misma cantidad de líquido ácido, ha cedido 0,090 gr. de K^2O después de un contacto de veinticuatro horas en frío; ó sea, en conjunto, 0,290 gr. de K^2O. Esta última cifra es una vez y media mayor que la que representaba la solubilidad de la potasa en el agua cargada de gas carbónico, en las condiciones del experimento citado antes (0,198 gr). Este poder disolvente del ácido acético puede ser considerado como análogo á un efecto natural, porque, como ya hemos dicho, este ácido existe en algunos suelos humíferos; pero la proporción de ácido empleada en el ensayo que acabamos de citar, es ciertamente mayor que la que debe encontrarse aun en los suelos húmicos más provistos de este ácido.

β. Acción del ácido clorhídrico diluído y frío.—El mismo peso de tierra que antes y el mismo peso de agua, conteniendo ésta 4 gramos de ácido HCl. Después de un contacto de hora y media en frío, la potasa disuelta era de 0,242 gr. de K^2O por kilogramo de tierra seca. El residuo, tratado con una cantidad igual de ácido clorhídrico, ha dado, después de veinticuatro horas de contacto en frío, 0,114 gr. de K^2O; tratado nuevamente con un ácido igual durante tres días en frío, el residuo ha dado 0,048 gr. de K^2O; ó sea en conjunto, 0,404 gr. de K^2O, cifra algo superior á la que ha suministrado el ácido acético.

γ. Acción del ácido nítrico diluído y frío. — La misma concentración que con el ácido clorhídrico, al cabo de hora y media de contacto: $K^2O = 0{,}202$ gr.; al cabo de veinticuatro horas, el residuo ha dado 0,064 gr. de K^2O; ó sea, en conjunto, 0,266 gr. de K^2O. Así, los ácidos acético, clorhídrico y nítrico, dan resultados á corta diferencia comparables, en las mismas condiciones de temperatura y de dilución.

Es evidente que, en estos ensayos, una parte de los ácidos empleados ha neutralizado primero el carbonato cálcico, y que el efecto del ácido *real*, esto es, del que ha quedado libre sobre la tierra, debe atribuirse á un ácido de una concentración inferior á la inicial. De todos modos, la tierra de que aquí se trata era poco rica en calcáreo.

δ. Acción de los ácidos más concentrados en frío y en caliente. —El ácido clorhídrico al $^1/_{10}$ (de ácido real), empleado á la temperatura del baño maría hirviente, durante dos horas, ha disuelto $K^2O = 0{,}789$ gr., ó sea una proporción triple de la obtenida en frío. El ácido nítrico da cifras análogas. Por último, una ebullición de diez y seis horas con ácido nítrico del comercio (N^2O^5, $4H^2O$), ha dado 1,026 gr. de K^2O por kilogramo de tierra seca; ó sea, sólo $^1/_9$ de la cantidad de potasa total que la tierra contenía. Este último ataque corresponde á las prescripciones que á menudo se indican para obtener la proporción de potasa llamada *utilizable* por los vegetales.

Las cifras que acabamos de exponer demuestran la influencia que ejercen la dilución, la duración del contacto y la temperatura de los ácidos sobre la solubilización de la potasa. Esta solubilización no da, en realidad, ningún informe sobre las formas de la potasa, ni sobre su grado de asimilabilidad. En frío, entre el ácido clorhídrico que actúa sólo como ácido y el ácido nítrico que puede oxidar ciertos principios orgánicos capaces de retener la potasa, no existe diferencia esencial. Cuando la tierra ha sido previamente calcinada, de modo que se haya destruído toda la materia orgánica, la acción del ácido clorhídrico diluído, tanto en frío como en caliente, suministra generalmente una proporción de potasa mayor que la que se obtiene en las mismas condiciones de temperatura y de dilución con la tierra no calcinada. Pero la cantidad de potasa así solubilizada, siempre es muy inferior á la proporción total de este álcali, determinada mediante el ácido fluorhídrico.

Se puede deducir, pues, de lo que precede, que es imposible definir, con el empleo de ácidos fuertes, las formas que la potasa presenta en el suelo. El uso de tales reactivos, el del ácido nítrico particularmente, todavía es recomendado por muchos autores, y es utilizado, aun en los métodos de

análisis oficiales, porque se cree equivocadamente que, entre los numerosos silicatos del suelo, los silicatos zeolíticos hidratados son los únicos que son atacados por los ácidos fuertes y, como tales, capaces de suministrar á la planta la potasa que contienen. Gracias á esta detención en el ataque de los silicatos por los ácidos fuertes concentrados, se puede llegar á resultados poco más ó menos concordantes en muchos análisis hechos de una misma muestra. Sin embargo, tal conclusión no está en modo alguno justificada; existen, en efecto, muchas tierras que ceden mucha potasa á los ácidos, pero, por el contrario, ceden muy poca á las plantas. Por otra parte, no se pueden dividir los silicatos en atacables é inatacables: esta distinción no representa apenas más que grados desiguales de la velocidad de disociación progresiva por los agentes atmosféricos de los diversos silicatos contenidos en las rocas primitivas (Berthelot y André).

El *grado de finura* de las partículas térreas debe, *a priori*, desempeñar un papel importante en la nutrición vegetal. Supongamos que una substancia, útil á la planta, esté repartida en proporciones desiguales entre los elementos gruesos del suelo y los elementos finos; es lógico pensar que, si esta substancia predomina en los elementos finos, presentará por este motivo mayor superficie de acción á los agentes naturales de disolución y suministrará con más facilidad á la planta el alimento que ésta requiere. Recíprocamente, si la substancia en cuestión predomina en los elementos gruesos, la facilidad de disolución y, por consiguiente, la asimilación será menor.

Esto es lo que Dumont (1904) ha comprobado respecto de la potasa. Cuando se quiere saber si una tierra requiere ó no abonos potásicos, es conveniente determinar la potasa total (por el ácido fluorhídrico) contenida en cada una de las porciones de esta tierra, que el análisis físico ha aislado (arena gruesa, arena fina, arcilla). Entonces se observará á menudo el hecho siguiente: Dos tierras que contienen la misma cantidad de potasa total, serán influídas muy desigualmente por la adición de abonos potásicos; la primera, por ejemplo, se aprovechará poco ó nada de la adición de estos abonos, porque el análisis habrá enseñado que en esta tierra la potasa

está sobre todo localizada en los elementos finos (arena fina y arcilla); la segunda, por el contrario, cuya potasa predomina en los elementos gruesos, debe resultar beneficiada con el empleo de dichos abonos. Esta observación puede aplicarse á todas las substancias nutritivas. He aquí un ejemplo de la distribución del ácido fosfórico en una tierra del Yonne (Rousseaux y Brioux, 1909).

	Composición física de la tierra en 100 partes	Ácido fosfórico: en cada uno de estos elementos para 1000 de tierra inicial	Ácido fosfórico: en 1000 partes de cada uno de los elementos físicos
Arena gruesa, silícea	897	0,112 gr.	0,135
— fina, silícea	150	0,172 »	1,146
— fina, calcárea	3,3	0,180 »	54,54
Arcilla	15,2	0,088 »	5,78
Humus	4,5	0,150 »	33,33
	1000,0		

D. Cal.—En el caso más general, esta base se encuentra en muchos estados en el suelo. El carbonato y el humato cálcicos son fácilmente descompuestos por los ácidos enérgicos diluídos: por medio de estos agentes se puede disolver la totalidad de la cal y conocer así exactamente la suma de los dos estados de esta base que son más útiles á los vegetales. Pero, y éste es un punto de la mayor importancia, no se define de esta manera el grado de *finura* del calcáreo. El calcáreo fino es el único útil y su actividad es tanto mayor, respecto de las reacciones en que toma parte en el suelo, cuanto más perfecto es su estado de división. Volveremos á ocuparnos más adelante en la manera como debe determinarse este grado de división. Los ácidos diluídos disuelven también la cal del fosfato tricálcico. De modo que, para determinar la cal que corresponde al calcáreo solo, es preciso determinar el volumen del gas carbónico que desprende, en contacto con un ácido, un peso determinado de tierra. En cuanto á la cal que se encuentra combinada en los silicatos complejos, resiste á los ácidos diluídos. Se la puede solubilizar algo con el empleo de ácidos concentrados sobre todo en caliente. Pero, la mayor parte de esta base permanece inalterada. Para evaluarla en su tota-

lidad, es necesario acudir al ataque de los silicatos mediante el ácido fluorhídrico.

Resumen.—Casi la totalidad de los elementos minerales de un suelo son extremadamente poco solubles en los disolventes naturales: agua y gas carbónico. Si estas disoluciones no se renovasen á medida que van siendo absorbidas por las plantas, éstas deberían tomar directamente su alimento de los fragmentos de rocas alrededor de los cuales crecen sus raíces. Las múltiples reacciones de doble descomposición que se efectúan en el suelo tienden á hacer creer que las disoluciones de éste se renuevan con una rapidez suficiente, á lo menos en ciertos casos, para suministrar á las plantas los elementos minerales que ellas requieren.

El empleo de disolventes, distintos de los disolventes naturales, proporciona, generalmente, indicaciones muy imperfectas sobre la cantidad de materia actualmente asimilable por el vegetal: los resultados así obtenidos deben interpretarse siempre con prudencia y deben comprobarse mediante un estudio comparativo directo hecho en el suelo de la cantidad de substancia vegetal producida.

Discutiremos nuevamente, con algunos pormenores, la trascendencia de las nociones que acabamos de adquirir cuando trataremos del análisis químico de los suelos, respecto de cuyo estudio el presente capítulo puede ser considerado como una introducción.

CAPÍTULO VIII

CONSTITUCIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS

Generalidades sobre la materia orgánica de los suelos.—Relaciones entre el carbono y el nitrógeno en las diferentes tierras; riqueza en carbono y en nitrógeno de la tierra de labor.—Diferentes variedades de humus.—Turba.—Propiedades químicas generales del humus.—El humus retiene materias minerales y nitrógeno.—Papel del humus respecto de los vegetales.—Combinación del humus con los elementos minerales y con el amoníaco.—Constitución química del núcleo nitrogenado del humus; acción de los ácidos; acción de los álcalis.—Acciones químicas naturales que simplifican el nitrógeno complejo del humus.—Absorción y emisión de amoníaco por la tierra de labor.—Olor propio de la tierra.—Atmósferas confinadas de los suelos.—Naturaleza, determinación, variaciones de los gases contenidos en los suelos.

Generalidades sobre la materia orgánica de los suelos.—La materia mineral de la tierra de labor está siempre mezclada con una cantidad variable de residuos orgánicos de origen vegetal y animal. Hemos visto ya (pág. 99) cómo se puede demostrar fácilmente la presencia de una substancia combustible en la tierra. Esta substancia contiene, no solamente carbono, oxígeno é hidrógeno, sino también nitrógeno. Presenta todos los grados de descomposición intermedios entre los tejidos de la planta viva (hojas, tallos) cuyos restos cubren el suelo después de su muerte ó quedan en su interior (raíces), y las partículas negras ó pardas, á menudo extremadamente finas, que recubren los elementos más pequeños de las rocas.

Entre los suelos fuertemente cargados de restos vegetales en estados de descomposición más ó menos avanzados, tales como las turberas, y los suelos puramente arenosos, muy pobres en elementos orgánicos, hay una infinidad de estadios de transición. Las transformaciones que sufre un vegetal muerto antes de alcanzar este estado particular en que su substancia se mezclará íntimamente con la substancia mineral del suelo, son la resultante de acciones complejas, de orden químico y de orden microbiológico. Dejaremos provisionalmente á un lado los fenómenos vivientes que intervienen en estas transformaciones, y consideraremos, en este capítulo, la cuestión desde el solo punto de vista químico.

Por de pronto hemos de preguntarnos *cuál es la constitución* de esta materia y qué papel químico desempeña respecto de los elementos minerales. No volveremos á tratar de su papel físico, que ya hemos definido y estudiado anteriormente (página 109), y sólo recordaremos de la química del humus, en lo que vamos á decir, los hechos que pueden servir para el conocimiento de la nutrición directa ó indirecta de los vegetales superiores.

Es evidente *a priori* que la materia orgánica de los suelos no puede ser una substancia homogénea. En efecto, se nos presenta en grados de descomposición más ó menos avanzados, dada la intensidad, variable según las circunstancias, de la acción de los agentes atmosféricos por una parte y de los agentes microbianos por otra, sobre la substancia vegetal de donde procede. Esta materia orgánica ha recibido diversos nombres: generalmente se la llama *materia húmica*, *materia negra*, *humus*, *ácido húmico*. No puede ser considerada como una especie química: es una mezcla de cuerpos hidrocarbonados y de cuerpos nitrogenados, muy difíciles de separar unos de otros. Se halla también en el humus una proporción apreciable de celulosa ó de hidratos de carbono que pueden transformarse en glucosa por los procedimientos ordinariamente usados. Además, las tentativas hechas con objeto de aislar la materia orgánica sola, partiendo de una muestra dada de tierra, demuestran que este humus arrastra siempre consigo cierta cantidad de elementos minerales sin que se pueda saber

si se trata de un *arrastre mecánico* ó de *una combinación*. Es probable que ocurran las dos cosas á la vez.

Con el objeto de simplificar su estudio y de buscar alguna analogía entre esta substancia y ciertos cuerpos de función química definida, se acostumbra á insistir en los caracteres ácidos del humus, considerándolo como un ácido capaz de unirse con las bases, cal, potasa, magnesia, para formar sales: de donde deriva la expresión frecuentemente empleada de *ácido húmico*. Pero, aun cuando el humus tenga reacciones ácidas innegables, ya que, donde abunda, descompone los carbonatos que se ponen en contacto con él y hace desprender su ácido carbónico, no representa una especie química definida. Las sales del ácido húmico nunca cristalizan, y la combinación de este ácido con una base, si desprende calor, corresponde sobre todo á la categoría *de las combinaciones llamadas de absorción* cuyos caracteres principales son: 1.°, no efectuarse en proporciones definidas; 2.°, realizarse entre una base cristaloide de peso molecular relativamente pequeño (cal, potasa, etc.) y un cuerpo ó una mezcla de cuerpos esencialmente coloidales de pesos moleculares muy elevados.

El carácter coloide del humus se manifiesta por el modo como esta substancia se comporta con el agua; se hincha y puede ocupar un volumen considerable. Si se deseca la masa húmeda, se encoge y se transforma en una substancia parda, córnea, amorfa, que fácilmente se reduce á polvo. Presenta, pues, en cierto modo, alguna semejanza con la arcilla. Disuelto en un álcali, como la potasa, el humus se separa nuevamente si se añade al líquido un ácido cualquiera; se forman copos pardos, amorfos, que, fuera del color, se asemejan á la sílice gelatinosa que se precipita de una solución de silicato sódico en que se vierte un ácido mineral. El coloide húmico, en seudosolución, no conduce la electricidad.

A veces se estudian, para mayor sencillez, las propiedades del coloides húmico, no partiendo de la substancia compleja que se extrae del suelo por la acción de un álcali seguida de una precipitación por un ácido, sino en un producto sintético que se obtiene fácilmente tratando en caliente un hidrato de carbono (azúcar ó glucosa) por un ácido concentrado: sulfúrico ó clorhídrico. Se obtiene así una masa negra, voluminosa, muy ligera después de desecación á 110°, y que se aproxima, por muchas de sus propiedades, al humus del suelo. Como está naturalmente exento de cenizas y de nitrógeno, las reacciones que presenta con las bases y las sales minerales son más fáciles de examinar que cuando se emplea el verdadero humus. Tendremos ocasión de usar algunas veces este humus artificial como objeto de investigaciones: pero esta materia tampoco puede ser definida químicamente, por más que su composición centesimal, cuando ha sido desecada á la temperatura constante de 110°, varía muy

poco de una muestra á otra (véase más adelante). Del mismo modo que el humus natural, el humus artificial se comporta como un coloide.

Papel múltiple de la materia orgánica en el suelo.— El humus—con este nombre designaremos generalmente desde ahora la materia orgánica de los suelos—desempeña un papel importante en el medio natural donde se deposita y con el cual se mezcla de una manera íntima. Por su origen es una materia nitrogenada. Cuanto más humus hay en el suelo, tanto más nitrógeno hay en él; el humus es la fuente primordial del nitrógeno de los suelos. Pronto veremos que este nitrógeno afecta en la molécula húmica una forma muy compleja, inasimilable para la mayoría de los vegetales en su estado actual. No puede ser utilizado por la planta más que cuando ha sufrido una serie de transformaciones químicas y microbiológicas destinadas á simplificar la estructura de su molécula inicial.

Si el humus es una fuente de nitrógeno, también es una fuente de carbono. Este carbono del humus debe ser considerado como un alimento para muchos organismos desprovistos de clorofila que pueblan el suelo; tal vez hasta juega un papel alimenticio respecto de algunas plantas superiores. Además —y éste es un hecho muy importante,—cuando el nitrógeno húmico toma sucesivamente las formas amoniacal y nítrica, el carbono se oxida, pasa al estado de gas carbónico, y la atmósfera interna de los suelos se enriquece de un poderoso disolvente de las rocas de toda clase que constituyen la tierra de labor.

En su calidad de materia coloide, el humus retiene grandes proporciones de agua. Forma fácilmente combinaciones *de absorción* con casi todos los elementos minerales útiles á las plantas y, mientras estas combinaciones subsisten, el alimento mineral es retenido en las capas superiores del suelo, donde precisamente se han depositado los restos vegetales engendradores del humus: así este elemento mineral se halla á disposición de las raíces. Cuando por el fenómeno de la oxidación, el núcleo carbonado desaparece, la substancia

mineral se pone en libertad y la planta puede absorberla.

Las sales potásicas y amónicas, que se aplican á los suelos en forma de abonos, se hundirían profundamente con rapidez por la acción de las lluvias si no interviniesen muchos factores para oponerse á su marcha y no fijasen temporalmente las sales añadidas: estudiaremos, á propósito del *poder absorbente*, el papel que desempeñan respecto de esto en el suelo algunos silicatos y algunos coloides como el humus.

Papel de ciertos animales en la producción del humus.— Si los fenómenos puramente químicos y, sobre todo, si las manifestaciones microbianas intervienen en primer término en la producción del humus, es indispensable señalar también la *influencia que ejerce la presencia de algunos animales* en la descomposición de las materias orgánicas del suelo. Ciertos insectos, crustáceos, moluscos, rizópodos, lombrices, después de haber dividido mecánicamente la materia orgánica, la emplean como alimento. En sus excrementos la substancia inicial ha sufrido ya transformaciones profundas atribuíbles á la acción de los jugos digestivos: estas transformaciones son tales que la materia orgánica así modificada es mucho más fácilmente oxidable ulteriormente. El nitrógeno y las substancias minerales de un suelo son más fácilmente solubles en el agua cuando este suelo contiene lombrices que cuando éstas no existen (Wollny). En los climas cálidos las transformaciones de esta naturaleza son infinitamente más enérgicas que en los climas templados. Á Darwin se debe haber señalado por vez primera el papel que desempeñan las lombrices en la producción del humus. Según Kostytcheff, las materias excrementicias de estos animales son invadidas poco á poco por hongos ó ciertas bacterias que, completando el trabajo digestivo anterior, hacen desaparecer todo indicio de estructura de las plantas que han servido primeramente para la alimentación de estos seres. Además, é independientemente de su trabajo químico de digestión, los gusanos de tierra, por su acción mecánica, modifican ventajosamente las propiedades físicas del suelo en sentido de una mayor permeabilidad para el agua y los gases.

Orden que conviene seguir en el estudio del humus.—El orden que conviene seguir en el estudio de las propiedades y del papel químico del humus se deduce de lo que acabamos de decir. Describiremos: 1.°, las relaciones ponderales que existen entre el carbono y el nitrógeno en las diversas tierras; 2.°, las diferentes variedades de humus; 3.°, las propiedades químicas generales del humus; 4.°, la constitución química del núcleo nitrogenado del humus; 5.°, la composición de las atmósferas confinadas del suelo y las variaciones del gas carbónico y del oxígeno. Las cuatro primeras partes se refieren al papel que podría llamarse *alimenticio* del humus; la última se refiere al papel indirecto que desempeña el humus respecto de la vegetación.

I

RELACIONES PONDERALES ENTRE EL CARBONO Y EL NITRÓGENO EN LA PLANTA, EN EL HUMUS Y EN LA TIERRA

Exposición de algunos resultados.—Busquemos cuál es la relación que existe entre el carbono y el nitrógeno en la planta primero y en el humus después, ó mejor en la misma tierra de labor. La comparación de esta relación, en los dos casos, nos dará datos importantes. Relativamente á las plantas, esta relación puede conocerse más exactamente mediante una determinación del carbono total y del nitrógeno orgánico (nitrógeno de los albuminoides y de las substancias congéneres).

Por lo que toca al humus, la relación entre el carbono y el nitrógeno también es fácil de determinar; basta hacer una determinación total de estas substancias en un peso conocido de tierra. En efecto, no existe en el suelo otro carbono que el carbono *orgánico*. Deberá cuidarse, en la determinación del carbono total, de restar el procedente de los carbonatos minerales: es ésta una operación elemental. La determinación

del nitrógeno total de la tierra por el método de la cal sodada da aproximadamente con exactitud el nitrógeno orgánico, porque el nitrógeno que contiene la tierra en forma *mineral* (nitratos, amoníaco) casi siempre es una fracción tan pequeña del nitrógeno total, que puede despreciarse sin inconveniente. (Véase capítulo X.)

Citemos ahora algunas cifras relativas á la relación entre el carbono y el nitrógeno en las plantas vivas. Esta relación es muy diferente según el órgano considerado y según su edad: porque, si la proporción de carbono, referida á 100 partes de materia seca (descontadas las cenizas), suministra cifras que varían poco (47 á 50), la proporción de nitrógeno, por el contrario, sufre grandes oscilaciones. Éstas son imputables á la *emigración del nitrógeno*, el cual, á medida que adelanta la vegetación, abandona en gran parte las raíces, los tallos y las hojas y va á concentrarse en las semillas. Esto es lo que enseña la siguiente tabla, sacada de análisis de trigo hechos en 1893 por Berthelot y André:

TRIGO SEMBRADO EN 15 DE MARZO DE 1893

		En 100 partes de materia seca (descontadas las cenizas)		
		Carbono	Nitrógeno	Relación $\frac{\text{Carbono}}{\text{Nitrógeno}}$
Planta joven (14 de abril)		48,89	3,48	14
Planta adulta (15 de mayo)	Raíces	47,14	1,23	38,3
	Tallos y hojas	47,86	2,28	21,0
Al principiar la formación de las espigas (12 de junio)	Raíces	47,44	1,03	46
	Tallos	47,67	0,81	58,8
	Hojas	48,91	2,41	20,3
	Espigas	48,20	1,99	24,2
En la proximidad de la cosecha (6 de julio)	Raíces	48,08	0,67	71,6
	Tallos	48,08	0,77	62,4
	Hojas	50,18	1,41	35,6
	Espigas	47,54	2,17	21,9

La relación $\frac{C}{N}$ es tanto más elevada cuanto más pequeña es la proporción de nitrógeno.

En cambio, esta relación es mucho menor en casi todas las tierras. Citemos, según Dehérain, las siguientes cifras:

	En 1 kilogramo de materia			
	Carbono	Nitrógeno	Relación $\frac{\text{Carbono}}{\text{Nitrógeno}}$	
Mantillo de hortelanos . .	99gr. 4	10gr. 50	9,4	(Boussingault).
Otra muestra	66 4	5 28	12,2	—
Tierra de Liebfrauenberg .	24 30	2 59	9,30	—
Herbazal de Argentan . .	40 90	5 13	7,9	—
Tierra de Grignon abonada regularmente	15 20	2 00	7,6	(Dehérain).
Tierra sin abonos	7 03	1 48	4,9	—
Prado (Grignon)	12 46	1 81	6,8	—
Cinco tierras de Puy-de-Dôme.	54 00	5 20	10,3	(Truchot).
	18 00	1 90	9,4	—
	6 00	0 46	13,0	—
	27 00	1 26	21,4	—
	5 20	0 46	11,3	—

Las variaciones de la relación $\frac{C}{N}$ son aquí todavía más marcadas. Bastante elevada en las tierras en buen estado de cultivo ó en ciertos suelos naturales ricos en materia orgánica, esta relación disminuye notablemente cuando la tierra está mucho tiempo sin abonos. Significa esto que la proporción de carbono disminuye mucho más pronto que la proporción de nitrógeno, porque, en el suelo, sobre todo si éste es algo calcáreo, la combustión del carbono, y por consiguiente su desaparición, son rápidas, mientras que el nitrógeno no desaparece del suelo y no es arrastrado por las aguas de infiltración hasta que está nitrificado. Y la nitrificación, como veremos más adelante, no se efectúa nunca, en el espacio de un año y aun en las condiciones naturales más favorables, más que respecto de una pequeña fracción del nitrógeno orgánico.

Eremacausia.—Se da el nombre de *eremacausia* (ἤρεμα, lentamente, καῦσις, combustión) á la *desaparición* lenta de la materia orgánica en la cual el carbono se volatiliza en forma de gas carbónico y el nitrógeno, del mismo modo que las materias minerales retenidas por el humus, toma una forma difusible y asimilable. La eremacausia es la resultante de fenómenos de orden químico y, sobre todo, de orden microbiano: es por un proceso esencialmente aerobio que desaparece entonces el carbono y el nitrógeno pasa al estado de amoníaco, después de nitritos y de nitratos, sin que ocurra pérdida de este nitrógeno en estado libre, á lo menos en la

mayoría de los casos. Por el contrario, cuando la cantidad de oxígeno que se pone en contacto con la materia orgánica es insuficiente, ó nula, se ve aparecer un desprendimiento gaseoso mucho más débil; los gases que se desprenden son ácido carbónico, formeno, hidrógeno, hidrógeno sulfurado, hidrógeno fosforado, óxido nitroso, nitrógeno libre: se trata entonces de fenómenos de anaerobiosis. Wollny, á quien se debe un estudio profundo de las materias húmicas, insiste en que no debe confundirse la *eremacausia* con la *descomposición pútrida,* porque, en el primer caso, hay volatilización del carbono y destrucción de la materia orgánica, mientras que, en el segundo, el desprendimiento gaseoso es mucho menor y la mayor parte del carbono queda combinado, ya sea en compuestos ternarios (ácidos grasos), ya sea en compuestos cuaternarios (ácidos amínicos). Queda entonces un residuo sólido, pardonegruzco, difícilmente atacable. En principio, una materia orgánica es tanto menos descomponible cuanto más avanzado está su grado de alteración. Debe atribuirse á este hecho la persistencia de la materia orgánica en ciertos suelos incultos que nunca reciben abonos, y que, á pesar de las causas múltiples de destrucción á que están sometidos sus elementos carbonados, contienen siempre un núcleo carbonado, á veces poco abundante, pero muy fijo.

Riqueza en carbono y en nitrógeno de la tierra de labor.—En realidad, las reservas de carbono y de nitrógeno contenidas en la tierra son á menudo considerables. Consideremos la superficie de una hectárea, y supongamos que la capa activa del suelo, esto es, aquella en que se encuentran las raíces y que les suministra los alimentos necesarios, sea homogénea y tenga una profundidad media de 40 centímetros. El peso de esta masa de tierra será de unas 4000 toneladas y contendrá (con 10 por mil de carbono y 1 por mil de nitrógeno, por ejemplo) 40000 kilogramos de carbono y 4000 kilogramos de nitrógeno.

Aquí es necesario hacer algunas observaciones. En lo que concierne al nitrógeno particularmente, parece que un aprovisiona-

miento tal como el que acabamos de indicar debe poder bastar sobradamente para cultivos, aunque sean exigentes y esto durante gran número de años. Sin embargo, ocurre frecuentemente que esta provisión no basta, *á lo menos desde el punto de vista de su calidad.* Es que, en efecto, la mayoría de las plantas del gran cultivo se desarrollan rápidamente; exigen, en el espacio de dos ó tres meses, elevadas proporciones de nitrógeno en una forma fácilmente asimilable, casi siempre la de nitrógeno nítrico. La nitrificación del nitrógeno orgánico es un fenómeno que progresa lentamente, aun suponiendo que existan las mejores condiciones para que se realice. De manera que esta transformación del nitrógeno orgánico del suelo no puede, en muchos casos, asegurar á las plantas una cantidad suficiente de nitrógeno, en forma simple, de que tienen imperiosa necesidad en un período de tiempo relativamente muy corto. Resulta de esto que el agricultor se ve obligado á esparcir en el suelo, ya en primavera, ya en el otoño precedente, abonos cuyo nitrógeno, fácilmente asimilable, está destinado á subvenir las necesidades de ciertos vegetales.

En cuanto al carbono, su desaparición es á menudo rápida, principalmente en los terrenos calcáreos. A esta desaparición corresponde una disminución en el poder que tiene el suelo de retener ciertas materias fertilizantes; es, pues, en pura pérdida que se aplicarían éstas al suelo en forma de abonos químicos, si no se restituye de vez en cuando á la tierra el carbono que ha perdido por combustión. Esta adición de carbono se efectúa en forma de estiércol ó de abono verde, según la situación económica del lugar donde está la tierra cultivada.

Por otra parte, este papel *indirecto* del carbono en la fertilidad de las tierras no es el único que merece fijar la atención: es posible, como hemos dicho ya (pág. 251), que, en este complejo que constituye el humus, exista una forma de carbono orgánico *directamente asimilable* por la planta: esto es lo que expondremos más tarde.

II

DIFERENTES VARIEDADES DE HUMUS

Las grandes diferencias que hemos observado en la relación entre el carbono y el nitrógeno en los suelos más diversos nos conducen á deducir que debe existir necesariamente un número considerable de variedades de humus. Hagamos sumariamente algunas indicaciones sobre este asunto.

Es evidente que la cantidad de humus que contiene ó que puede contener un suelo depende, ante todo, de la presencia del factor que es el origen mismo del humus, esto es, de la mayor ó menor facilidad con que las plantas se desarrollan en el suelo considerado. Á una tierra que recibe poca agua corresponde una vegetación lánguida, sobre todo si la media anual de la temperatura es elevada. Esta tierra será, por consiguiente, pobre en humus. Por el contrario, en las regiones que reciben suficiente cantidad de agua de lluvia ó de riego, la masa de la materia vegetal producida será mucho mayor, y el humus que de ella procede podrá alcanzar un peso muy notable. En una palabra, la proporción de humus está en razón directa de la fertilidad del suelo. No hablamos aquí más que de las *tierras de labor,* esto es, de las tierras provistas de una proporción suficiente de calcáreo: dejaremos aparte, por ahora, las tierras turbosas.

La eremacausia, la volatilización lenta del carbono de la materia orgánica, ó, lo que viene á ser lo mismo, la desaparición del humus, dependen ante todo de tres factores principales: el aire, la humedad y la temperatura. Si uno de estos factores llega á faltar, no se efectúa la eremacausia, ó este fenómeno es más ó menos retardado. Si falta aire, el desprendimiento gaseoso es débil y el gas carbónico va acompañado de metano ó de hidrógeno; la materia orgánica persiste, pero se modifica poco á poco su composición. Se trata aquí de fenómenos de reducción ó de putrefacción. Si el aire penetra bien en la materia orgánica, y si la temperatura es bastante elevada, pero el clima es seco, el humus se destruye rápidamente. Si el aire es suficiente y la proporción de humedad es bastante elevada, pero la temperatura exterior es baja, la combustión del humus es lenta. La oxidación no llega, pues, á su máximo más que cuando los tres factores precedentes están reunidos. Boussingault ha observado, hace mucho tiempo, que en ciertas regiones tropicales no se forma capa de humus ó que, á lo ménos, ésta desaparece muy rápidamente, dada la elevación de temperatura cuya acción favorable se añade á la de los otros dos factores indispensables, aire y humedad.

Observemos que las propiedades físicas del suelo juegan un papel importante en la oxidación del humus, porque el aire penetrará tanto mejor en la tierra cuanto más permeable ésta sea. Resulta de lo que antecede que se puede acelerar la eremacausia aumentando la intensidad de uno de los tres factores de su producción. El trabajo del suelo, por ejemplo, determina la disgregación de la tierra; favorece, por consiguiente, los fenómenos de oxidación y aumenta las facilidades de contacto del agua de lluvia con las partículas térreas. Los suelos incultos, pero que están cubiertos de vegetación durante muchos años (bosques, praderas), se enriquecen en humus, porque los restos vegetales que caen en su superficie (hojas), ó los que quedan en su interior (raíces), permanecen en su sitio, sin que ningún trabajo intervenga para modificar las condiciones de aereación propicias á su oxidación.

La *repartición* de la materia húmica en el suelo nunca es uniforme. Por regla general, la cantidad de esta materia húmica disminuye cuando crece la profundidad. Volveremos á hablar de esta distribución. La *alterabilidad* de la materia vegetal varía igualmente con el estado físico de esta materia y con la naturaleza de los órganos de la planta que la han producido. Una planta seca es menos alterable que una planta fresca; según Wollny, la paja de las leguminosas se altera más pronto que la de los cereales. Las hojas secas, sobre todo las que son resinosas, se descomponen muy lentamente. Pero la *turba*, de la que vamos á decir algunas palabras, de todas las substancias orgánicas procedentes de los vegetales es la más fija.

Turba.—Se designa con este nombre un producto esponjoso, pardo ó negro, que procede de la descomposición lenta debajo de una capa de agua de ciertos vegetales acuáticos, principalmente del género *Sphagnum*. Se forma en el aire, en las aguas límpidas que no contienen sulfato, ni carbonato de cal, ni arcilla en suspensión: substancias todas estas que impiden el desarrollo de los *Sphagnum*. Cuando estos vegetales, cuya base está inmergida, mueren, se descomponen en condiciones de aereación muy incompleta, y la mayor parte de su carbono queda en forma de esta masa esponjosa y negruzca que constituye la turba. Muchos otros vegetales distintos de los *Sphagnum*, y aun vegetales fanerógamos, pueden tomar parte en la formación de la turba. La fijeza de ésta se debe á que los organismos inferiores, que primero han modificado la materia vegetal inicial hasta un primer estadio de humificación, han acumulado en la masa notables cantidades de substancias ácidas (humus ácido) que dificultan el des-

arrollo de las bacterias. Y éstas son los agentes más activos de la destrucción completa del núcleo carbonado del humus.

La *composición* de la turba varía con el grado de degradación á que ha llegado. Según Detmer, una turba tomada de la superficie y, por lo tanto, de formación reciente, contiene, por término medio, en 100 partes de materia seca: carbono = 57.73, hidrógeno = 5,41, oxígeno = 36,06, nitrógeno = 0,80, cenizas = 2,72. Su color es pardo. En un nivel inferior, la turba tiene un color negruzco; su proporción de carbono y de nitrógeno aumenta, mientras que su riqueza en oxígeno disminuye. Una turba de esta naturaleza contiene, por término medio: C = 62,09, H = 5,21, O = 30,67, N = 2,10; cenizas = 7,42. A una profundidad todavía mayor, la turba toma un aspecto completamente negro, y su composición media es la siguiente: C = 64,07, H = 5,01, O = 26,87, N = 4,05; cenizas = 9,16. La riqueza en carbono aumenta, pues, con la edad de la turba.

En realidad, resulta de los numerosos análisis que la composición de la turba varía según las localidades y la edad del depósito; su riqueza en carbono oscila entre 52 y 64 por 100; su riqueza en nitrógeno, entre 0,8 y 5 por 100. Cuando se descuentan las cenizas y se establece la *relación atómica* entre el hidrógeno y el oxígeno, se encuentra que esta relación indica un exceso de hidrógeno sobre la cantidad capaz de formar agua con el oxígeno. El peso de las cenizas que dan 100 partes de turba es extremadamente variable.

La composición de la turba difiere, pues, notablemente de la de los tejidos vegetales propiamente dichos. En efecto, la composición centesimal media de la parte orgánica de una planta, cenizas y nitrógeno descontados, corresponde aproximadamente á los números siguientes: C = 50, H = 6, O = 44.

La composición de *la materia mineral* de la turba es muy variable. En general, la turba contiene poco ácido fosfórico: 0,04 á 0,15 por 100; su riqueza en potasa es tanto más elevada cuanto más impermeable sea el suelo donde se halla la turbera, porque, si las aguas filtrasen, arrastrarían á esta base.

III

PROPIEDADES QUÍMICAS GENERALES DEL HUMUS

Estas propiedades han sido estudiadas por muchos autores, y han sido resumidas de un modo magistral por Wollny, á cuyos trabajos siempre es bueno recurrir en este caso. El

humus puede ser definido, desde el punto de vista de sus propiedades químicas, como una materia hidrocarbonada que retiene con una gran energía el nitrógeno y las substancias minerales. Es evidente que la presencia de estas substancias en el núcleo carbonado del humus es una consecuencia de su origen: los tejidos vegetales contienen durante la vida numerosos compuestos nitrogenados y salinos, por lo tanto es natural que se encuentre á lo menos una parte de estos compuestos en los productos de la alteración de la materia vegetal.

Núcleo orgánico. — De hecho, debe considerarse al humus como una especie de materia albuminoidea. Partiendo de este concepto es como se han llegado muy recientemente á aislar de la materia negra del suelo ciertas substancias de peso molecular poco elevado (ácidos amínicos, entre otros), empleando procedimientos de desdoblamiento análogos á los que se han usado respecto de las materias albuminoideas propiamente dichas.

Mulder (1840) distinguía cuatro materias húmicas artificiales principales; *la ulmina y el ácido úlmico,* que se pueden preparar haciendo actuar sobre el azúcar de caña ácidos enérgicos, pero diluídos, á una temperatura inferior á la de la ebullición. Los copos negros que se forman en esta reacción serían una mezcla de *ulmina,* insoluble en los álcalis, y *ácido úlmico,* soluble en ellos. Si se trata el azúcar por ácidos concentrados, en contacto con el aire, y se prolonga la ebullición, se forman entonces *humina* y *ácido húmico,* cuerpos negros; insoluble el primero y soluble el segundo en los álcalis. La humina y el ácido húmico son más ricos en carbono y menos ricos en hidrógeno que la ulmina y el ácido úlmico. Estos dos últimos cuerpos se encontrarían de preferencia en el *humus pardo,* los otros dos en el *humus negro,* que es un producto de descomposición más avanzado que el humus pardo. Según Mulder, el ácido húmico artificial ó natural es capaz de unirse con el amoníaco. Por otra parte, el ácido húmico natural contiene siempre nitrógeno en una forma muy estable, porque los reactivos más enérgicos nunca le quitan más que una parte de este nitrógeno: parece, pues, que uno de los componentes carbonados del humus es un cuerpo nitrogenado.

En la composición de estos productos, tanto artificiales como naturales, existen algunas diferencias. En principio—y la mayor parte de los experimentadores están de acuerdo sobre este punto—los ácidos húmicos cambian de composición cuando se les trata durante

un tiempo prolongado con ácidos minerales hirvientes. Su proporción de carbono aumenta y su proporción de hidrógeno disminuye.

El ácido húmico del azúcar contendría aproximadamente 64 por 100 de carbono y 4,5 de hidrógeno, mientras que el ácido húmico de la tierra contendría de 56 á 59 por 100 de carbono. de 4,5 á 5,1 de hidrógeno y de 2 á 4 por 100 de nitrógeno.

Para darse cuenta de la diferencia de composición entre los generadores de las materias húmicas (celulosa y albuminoides) y estas mismas materias, basta comparar los análisis centesimales de cada uno de estos productos:

	Celulosa $(C^6H^{10}O^5)^n$	Albúmina (según la fórmula de Lieberkühn $C^{72}H^{112}N^{18}O^{22}S$)	Parte orgánica de las raíces de alfalfa (descontadas las cenizas)	Ácido húmico natural [media] (descontadas las cenizas)
Carbono . .	44,44	53,59	47.23	59.00
Hidrógeno. .	6,18	6,95	6,53	4.50
Oxígeno . .	49,38	21,84	44,18	33.50
Nitrógeno. .	»	15,64	2,06	3,00
Azufre. . .	»	1,98	»	»
	100,00	100,00	100,00	100,00

Comparado con la celulosa, el ácido húmico es más rico en carbono y más pobre en hidrógeno y en oxígeno. El nitrógeno que contiene este ácido procede de los albuminoides de las plantas. Entre la composición de la parte orgánica de una planta (raíces de alfalfa. por ejemplo) y la del ácido húmico, se observa igualmente esta diferencia esencial de mayor riqueza en carbono del ácido húmico. Si la proporción del nitrógeno contenido en el ácido húmico es, en general, mayor que la proporción del nitrógeno contenido en la planta. esto se debe á que una parte del carbono de la materia vegetal ha desaparecido en forma de gas carbónico durante la humificación y que el nitrógeno, que no se elimina en estado elemental, queda combinado con la molécula carbonada.

Considerado en su conjunto, el humus es poco soluble en el agua. pero se hincha mucho en contacto con este líquido. Cuando se trata por un álcali (potasa, amoníaco) una tierra rica en humus, ó la misma turba, una parte de la substancia carbonada se disuelve *(ácido úlmico, ácido húmico)*, y otra parte queda insoluble *(ulmina, humina)*. De la solución alcalina, adicionada de un ácido cualquiera, se precipitan copos pardonegruzcos de ácido úlmico ó de ácido húmico.

El humus contiene siempre materias minerales y nitrógeno.—El ácido húmico se combina fácilmente con bases como la cal, la magnesia, el óxido de hierro; pero estas

combinaciones sólo son de absorción, no en proporciones definidas. Los humatos alcalinotérreos, y especialmente lo que se llama *humato de cal,* desempeñan un papel muy importante en los suelos. Bajo esta forma, el ácido húmico es particularmente oxidable, y sabido es con qué rapidez desaparece á veces la materia orgánica de una tierra cuando se le incorpora cal viva ó carbonato cálcico.

Hay un punto capital que no debe olvidarse de mencionar en la historia del humus. Cuando se disuelve, como hemos dicho antes, la materia orgánica del suelo en un álcali y se precipita la solución parda por un ácido, los copos así obtenidos *contienen siempre nitrógeno* en una forma compleja que trataremos pronto de definir, así como *substancias minerales,* cuyas proporciones varían con la naturaleza de la materia húmica inicial, pero en las cuales se encuentra generalmente ácido fosfórico, cal, magnesia, alúmina, potasa, azufre, hierro, sílice. Este hecho es de extremada importancia: porque, y no se repetirá nunca demasiado, estas substancias así *aprisionadas* en el coloide orgánico no son puestas á disposición de las plantas más que cuando el humus es destruído por oxidación y su núcleo carbonado desaparece en estado de gas carbónico. Examinaremos ulteriormente algunas de las propiedades de estas seudocombinaciones que contrae el humus con las substancias minerales.

En cuanto al *nitrógeno,* está unido de una manera tan enérgica con el núcleo carbonado que, si se hierve humus con una solución de sosa ó de potasa, no se elimina más que una parte de este nitrógeno en estado de amoníaco; el resto queda combinado en la molécula carbonada, de donde no se desprende más que después de un tratamiento muy prolongado.

Desde el punto de vista de su utilización por los vegetales, este nitrógeno parece comportarse como las materias minerales de que se acaba de tratar. Unido al núcleo carbonado, verosímilmente es poco activo ó tal vez inerte respecto de la mayoría de las plantas: no se vuelve activo más que cuando queda libre. Y como no es probable que, en las condiciones habituales, la oxidación del carbono húmico vaya acompañada de desprendimiento de nitrógeno en estado gaseoso, se debe admitir que el núcleo nitrogenado del humus, después de

haber experimentado una serie de transformaciones cuyos agentes activos son seres microscópicos, toma finalmente la forma transitoria de amoníaco y, definitivamente, la de ácido nítrico, si se encuentran realizadas ciertas condiciones de medio. Hablaremos, á continuación, de estas metamorfosis sucesivas del complejo nitrogenado: examinaremos su estructura y veremos más adelante cuáles son los agentes vivos que transforman el amoníaco en ácido nítrico.

Relativamente á la multiplicidad de las materias que gravitan alrededor del núcleo carbonado del humus, Eggertz (1889) ha dado los siguientes análisis de 13 precipitados obtenidos tratando una solución alcalina de humus por un ácido mineral.

En 100 partes:

Carbono	40,8 á 56,1
Hidrógeno	4,3 á 6,6
Nitrógeno	2.6 á 6,4
Oxígeno	25,0 á 38,0
Sílice	0,4 á 10,4
Fósforo	0,15 á 7,6
Azufre	0,55 á 2,0
Alúmina y óxido férrico	0,4 á 3,9

Variaciones de la proporción del nitrógeno y de las materias minerales en los diversos humus. — Según Wollny, el nitrógeno se acumula tanto más en el humus en forma de compuestos difícilmente alterables cuando falta uno de los factores de la eremacausia; inversamente, si todos estos factores actúan al máximo, el nitrógeno desaparece rápidamente en forma amoniacal, después en forma nítrica. Hilgard ha demostrado que el humus de las regiones áridas es infinitamente más rico en nitrógeno que el de las regiones húmedas. Se ve, pues, aquí la influencia del factor *agua*. Del mismo modo, cuando la temperatura es baja, el nitrógeno se acumula. De todas maneras, la ausencia del factor *aire* es lo que produce en los humus la mayor riqueza en nitrógeno.

Relativamente á la proporción de la materia mineral contenida en el humus, puede decirse que ésta es tanto más abundante cuanto más difícil es la descomposición del humus. Todas las causas que dificultan que se ponga en libertad el nitrógeno en una forma difusible (amoníaco, ácido nítrico) constituyen igualmente un obstáculo á que se pongan en libertad las materias minerales. Esto explica por qué las propor-

ciones del carbono, del nitrógeno y de las cenizas aumentan en la turba á medida que se arranca ésta de capas más profundas: se ve entonces, paralelamente, disminuir las proporciones del hidrógeno y del oxígeno.

Como hace observar Wollny, las variaciones del nitrógeno y de las materias minerales en los humus de la tierra de labor propiamente dicha son difíciles de conocer, porque estos humus están mezclados íntimamente con la tierra, y entonces los análisis no tienen más que un valor muy limitado. El humus recubre las partículas térreas de una suerte de revestimiento; cuando se estudia la repartición del nitrógeno de este humus en 100 partes de los diversos elementos constitutivos del suelo, se observa, según Dumont, que los elementos más finos son los que tienen mayor riqueza de nitrógeno.

Acción del oxígeno sobre el humus.—Berthelot y André (1892) han examinado la acción del oxígeno sobre un ácido húmico artificial derivado del azúcar (que contenía C = 66,41, H = 4,57, O = 29,00). En frío y en la obscuridad, esta acción es inapreciable ó dudosa, aun al cabo de mucho tiempo; pero, á la luz, no ocurre lo mismo. Si se introducen en un gran frasco algunos gramos de este ácido húmico ligeramente mojado con agua y se expone el conjunto á la luz solar, se ve que la materia parda poco á poco se vuelve amarillenta: al mismo tiempo se desprende gas carbónico, cuya presencia puede comprobarse aspirando el aire del frasco y haciéndolo pasar por agua de cal.

Se consigue, también, con el humus natural extraído del suelo mediante un álcali y precipitación por un ácido: este humus se vuelve amarillo, al mismo tiempo que se desprende gas carbónico. El humus natural parece menos alterable que el humus artificial: se debe esto al mayor grado de división de este último. Esta oxidación es atribuíble, en el caso presente, á un fenómeno puramente químico. En las condiciones naturales, intervienen también ciertos microorganismos: existe, pues, aquí una doble causa de destrucción de la materia orgánica de los suelos. La absorción del oxígeno por la materia húmica es más rápida en presencia de un álcali como la potasa.

Nikitinsky (1902) ha confirmado estos resultados: la elevación de la temperatura, la insolación, la humedad, aceleran mucho esta oxidación puramente química. Pero, cuando existen microorganismos, la oxidación es incomparablemente más rápida.

Papel del humus respecto de los vegetales. — El humus desempeña, respecto de la vegetación, un papel *indi-*

recto y un papel *directo*. Su papel indirecto no puede ser negado, porque la oxidación del humus engendra el gas carbónico cuyas propiedades disolventes de las materias minerales han llamado más de una vez nuestra atención. Se sabe también que, cuando un suelo está cubierto de una espesa capa de materia vegetal en vías de descomposición (capa de hojas, por ejemplo), los elementos minerales sufren poco á poco una suerte de desmoronamiento que se completa luego por una acción de disolución. Además, el núcleo nitrogenado de este humus y su núcleo mineral son puestos en libertad en formas especialmente propicias á la absorción vegetal cuando el carbono desaparece.

Parece, pues, según esto, que un suelo rico en humus debe poseer un grado de fertilidad mayor, siendo iguales las demás circunstancias, que un suelo en el cual el elemento orgánico escasea ó falta. Sin embargo, la acumulación del humus no es ventajosa para los vegetales—y nos referimos aquí sobre todo á los del gran cultivo—más que cuando la destrucción de este humus es posible, esto es, que se realicen las condiciones favorables de la *eremacausia*. Si no ocurriese esto, el suelo que contiene este humus será estéril, porque el núcleo carbonado, difícilmente oxidable fuera de las condiciones que hemos especificado antes, retendría enérgicamente el nitrógeno y las materias minerales útiles á las plantas que no podrían aprovecharse de ellas. No se puede fijar *a priori* mediante una cifra la proporción óptima de humus que debe contener el suelo, porque esta proporción depende esencialmente *de las cualidades oxidantes* que el suelo posea. Si no existe calcáreo, el humus persistirá mucho tiempo en su forma primera; si es demasiado compacto, el aire no penetrará bien y la materia orgánica seguirá como tal.

Busquemos ahora cuál es el papel *directo* que el humus puede desempeñar respecto de la vegetación. Antes de la aparición de los hermosos trabajos de Liebig (1840) sobre la nutrición mineral de la planta, se admitía que un suelo es tanto más fértil cuanta más materia orgánica contiene. Ésta, procediendo de la vida de la planta, debía necesariamente volver directamente á ella. Liebig, como se sabe, combatió victoriosamente esta opinión, y demostró que la nutrición

vegetal era puramente *mineral*. El humus es inútil como materia carbonada; su papel no principia hasta que se destruye y cuando devuelve así al medio ambiente, en forma inorgánica, los cuerpos simples que entran en su composición: el carbono en estado de gas carbónico, el nitrógeno en estado de amoníaco, el hidrógeno en estado de agua. Sin embargo, muchos observadores, á pesar de admirar la exactitud de estas ideas, habían observado que, donde el humus falta, aparece la esterilidad, aun cuando el suelo contenga suficientes cantidades de las materias fijas indispensables á la planta. De donde deriva la idea, formulada en diversas ocasiones, de la posibilidad de la absorción por el vegetal de una parte de la materia carbonada del suelo. Hemos visto antes el resultado de los experimentos de Grandeau y de Petermann sobre la diálisis de las tierras. Dumont (1897) ha demostrado también que los humatos solubles son dializables, y que cierta proporción de materia orgánica acompaña siempre en esta diálisis á la materia mineral. Para acelerar el paso de los líquidos á través de una membrana de papel pergamino, es necesario disminuir algo la presión en el interior del dializador.

Puesto que la materia orgánica puede atravesar la membrana de un dializador, es permitido creer que atravesará también las membranas de una raíz viva. La cosa no es dudosa en el caso de los vegetales desprovistos de clorofila, especialmente los hongos, que, la mayor parte del tiempo, viven en el humus ó en suelos muy cargados de materia orgánica. Ciertas moléculas carbonadas y nitrogenadas, contenidas en el complejo que hemos llamado *humus*, deben ser consideradas como el origen del carbono y del nitrógeno de estos vegetales. Además, estas plantas superiores que no contienen clorofila (Orobanques, *Monotropa*, *Neottia nidus avis*, etc.) deben, como los hongos, tomar su alimento del medio orgánico complejo en que vegetan sus raíces. Lo mismo ocurre verosímilmente con ciertos vegetales superiores que viven en los restos de plantas muertas (saprofitismo) y cuyas hojas son con todo verdes (Rinanteas), así como con las plantas en cuyas hojas la clorofila es poco abundante ó está mal distribuída.

Frank publicó, en 1885, un notable trabajo que aclara con nueva luz esta cuestión que hasta entonces estaba muy obscura. Si se examinan las raíces de muchos vegetales que viven en el humus ó en suelos muy cargados de materias orgánicas, como las de muchos árboles de bosques que crecen en suelos llamados *ácidos* donde la nitrificación del nitrógeno no se efectúa, se observa que estas raíces viven en *simbiosis* con ciertos elementos micelianos ó *mycorhizas*. Estas criptógamas, de naturaleza especial, serían en cierto modo un lazo de unión entre la planta cuyas raíces las llevan y el propio humus. Las materias nutritivas que éste contiene, tanto si son carbonadas como nitrogenadas ó minerales, serían digeridas por las mycorhizas y ofrecidas luego á la raíz hospitalaria en una forma apropiada para la asimilación y la utilización. La presencia

de mycorhizas coincidiría con la dificultad que encontraría la planta en substraer al suelo los elementos que necesita. Esta simbiosis tiende, por otra parte, á desaparecer cuando un suelo se empobrece en materia orgánica.

Parece, pues, indudable que, por intermedio de ciertos organismos simbióticos, un gran número de plantas provistas de clorofila toma directamente de los suelos humíferos probablemente la totalidad de su nitrógeno y una parte, á lo menos, de su carbono. Pero. donde faltan estas mycorhizas y donde la proporción del suelo en humus es mucho más escasa que en los medios en que las mycorhizas abundan, ¿puede haber todavía *absorción directa* de materias carbonadas? La demostración de esta absorción es más difícil de dar en este caso: apenas se tienen aquí más que algunas pruebas indirectas que, sin embargo, no dejan de tener algún valor.

Indiquemos sumariamente las observaciones de Dehérain sobre este punto especial (1891). En cierto número de vasos pone el autor pesos iguales de muestras de las tierras siguientes: 1.°, tierra de buena calidad; 2.°, tierra agotada por el cultivo, poco rica en materia orgánica; 3.°, la misma tierra, adicionada de abonos químicos; 4.°, la misma tierra, adicionada de la materia negra del estiércol (obtenida dirigiendo una corriente de vapor de agua á una masa de estiércol); 5.°, la misma tierra, adicionada de materia negra del estiércol y de abonos químicos. He aquí, referidos á la superficie de una hectárea, los pesos de una cosecha de cáñamo que se había desarrollado en cada una de estas macetas:

1.°, 1 848 kilogramos; 2.°, 1 230 kilogramos; 3.°, 1 368 kilogramos; 4.°, 1 542 kilogramos; 5.°, 2 324 kilogramos.

El análisis de las aguas de infiltración de cada maceta enseña, además, que en la quinta, donde hay el máximo de rendimiento, es donde ha sido mejor la utilización del nitrógeno nítrico.

Un cultivo de *ray-grass* ha dado los siguientes rendimientos en las mismas condiciones:

1.°, 3960 kilogramos; 2.°, 2020 kilogramos; 3.°, 3180 kilogramos; 4.°, 3060 kilogramos; 5.°, 3780 kilogramos.

El rendimiento de la quinta experiencia llega casi al de la primera; lo que parece demostrar que la tierra agotada no ha recobrado su fertilidad natural hasta que ha recibido, no solamente abonos químicos, sino también, además, materia orgánica. El análisis de las aguas de infiltración enseña que la riqueza de estas aguas en nitrógeno nítrico era mínima en los ensayos 1 y 5, máxima en el ensayo 3. Así, pues, las plantas han utilizado tanto mejor el ácido nítrico del suelo cuanto más se acercaba la composición de éste al de una buena tierra.

Aun cuando en esta interpretación de la absorción directa del humus por las plantas exista todavía gran incertidumbre, no se puede negar, de todos modos, que la presencia de can-

tidad suficiente de materias orgánicas en el suelo favorece la absorción de las substancias minerales que, sin la influencia de este factor, serían mal utilizadas. La *digestión* del humus por la raíz, en ausencia de micorhizas, es, por otra parte, una cosa posible; las excreciones gaseosas de las raíces (CO^2), tal vez también algunas secreciones diastásicas, no serían extrañas á la transformación del humus en contacto con la raíz y á la *selección osmótica* por esta raíz de tal ó cual elemento orgánico cuya naturaleza y cuya composición todavía se desconocen. (Véase sobre este asunto nuestra *Química vegetal.)*

No debe olvidarse, sin embargo, que se pueden obtener, en medios artificiales, *rigurosamente desprovistos de materia orgánica,* plantas tan vigorosas como en los mejores suelos.

Seudocombinaciones del humus con los elementos minerales.—Este asunto se relaciona directamente con la noción del poder que tienen los suelos de buena calidad de retener ciertos principios fertilizantes y de impedir que sean arrastrados por las aguas pluviales. Volveremos á tratar de este tema más adelante. Consideraremos solamente aquí el punto siguiente: ¿de qué naturaleza son las combinaciones que forma el humus con los elementos naturales? No nos fijaremos más que en los hechos referentes á las seudocombinaciones del humus con dos elementos nutritivos esenciales: el ácido fosfórico y la potasa; las combinaciones del humus con la cal desempeñan más bien un papel de orden físico.

De todas las substancias minerales que quedan unidas al humus, en tanto que la destrucción de éste no es completa, tal vez el ácido fosfórico es la más importante. Hemos visto anteriormente (pág. 254), que no se podía evaluar la *proporción total* del fósforo contenido en una tierra dada más que calentando esta tierra, mezclada previamente con carbonato sódico, en una corriente de oxígeno. Así, pues, si el fósforo no existiese en el suelo más que en estado de fosfatos minerales libres, se conseguiría siempre eliminar éstos haciendo digerir la tierra durante un tiempo suficiente con ácidos fuertes (clorhídrico ó nítrico). Se deduce de esto que la materia orgánica de los suelos contrae una especie de combinación íntima con el ácido fosfó-

rico, combinación muy estable ya que no es descompuesta por los ácidos enérgicos. Es lógico admitir que los elementos fosfoorgánicos que forman parte de ciertos tejidos de la planta viva (nucleínas, lecitinas) se encuentran en el humus que procede de estos tejidos en la forma de un *núcleo orgánico fosforado particular*, el cual, sin duda, no se parece ya al núcleo primitivo. Sea lo que quiera, el fósforo no es puesto en libertad más que cuando la molécula orgánica del humus está completamente oxidada. Graudeau (1872) y Simon (1875) habían ya llamado la atención sobre la existencia de combinaciones del humus con el ácido fosfórico. Dumont ha demostrado ulteriormente que las soluciones de humatos alcalinos, exactamente neutralizadas y hervidas, disuelven notables cantidades de fosfatos de hierro y de aluminio por un contacto de algunos días. Importa notar este hecho, porque estos fosfatos son considerados con razón como poco utilizables por las plantas bajo esta forma.

Si se trata un humato alcalino (el de potasio, por ejemplo), exento de carbonato, por una solución de fosfato monocálcico, se forma una especie de combinación: se puede considerar que el ácido fosfórico ha entrado en ella en una forma especial, la de *humofosfato* (Dumont). Estos humofosfatos son escasamente solubles en el agua: la cantidad de ácido fosfórico que se disuelve es próxima á la que ha encontrado Schlœsing hijo en las disoluciones de los suelos, obtenidas según hemos dicho antes (pág. 230). La presencia de los humofosfatos en el suelo es verosímil; porque, según Dumont, las soluciones de gas carbónico que rodean las partículas térreas movilizan su potasa y disuelven el fosfato tricálcico. La potasa, así libertada en estado de carbonato, ataca la materia húmica, y el humato alcalino reacciona con el fosfato térreo para formar un humofosfato.

Es evidente que no se pueden considerar estos humofosfatos como combinaciones definidas: son *combinaciones de absorción*, cuya composición varía con la naturaleza del humus que entra en juego. Se comprende que debe ser así, porque el humus no es más que una mezcla de substancias orgánicas que representan estados sucesivos de la degradación de la materia vegetal. Según ciertos autores (A. Petit, 1911), esta fijación del ácido fosfórico en el humus (mantillo, por ejemplo), sería atribuíble, menos á la misma materia orgánica que á las materias minerales, tales como la cal, la alúmina, el óxido férrico, que esta materia orgánica contiene.

Sin embargo, según Stoklasa, la materia orgánica de los suelos contendría verdaderos *fosfatidas* (lecitinas, núcleoproteínas), que podrían fácilmente extraerse mediante el éter y el alcohol absoluto. Aso (1903) demostró ya que una parte del fosfato encontrado en los suelos humíferos se halla en ellos en la forma orgánica de nucleínas.

La materia húmica artificial, obtenida mediante hidratos de carbono, descompone los fosfatos alcalinos que se ponen en su contacto. Si se trata en frío una solución de fosfato bisódico por algu-

nos gramos de está materia húmica, se observa, después de la agitación de la masa, que el magma, echado en un filtro, deja escurrir un líquido fuertemente coloreado que contiene humato sódico. El ácido húmico ha descompuesto, pues, una parte del fosfato bisódico. El residuo sólido, lavado con agua y desecado á 100°, contiene ácido húmico, sosa y cierta cantidad de ácido fosfórico: ha habido, pues, fijación de este último por la materia negra. Se obtiene un resultado análogo empleando el fosfato biamónico; el amoníaco se fija en el ácido húmico en proporción notable, y la proporción de ácido fosfórico, retenido después del lavado por el compuesto insoluble, es mucho mayor que en el caso del fosfato bisódico (Berthelot y André). Se puede, por lo tanto, deducir de estos experimentos que los abonos fosfatados, solubles ó no, contraen con el ácido húmico una combinación de absorción que resiste á la acción del agua.

Citemos aún los siguientes hechos relativos á las seudocombinaciones que la materia húmica forma con las bases y, principalmente, con la potasa. Todas las veces que se trata la turba, ó simplemente tierra algo cargada de materia orgánica, por amoníaco, y que se precipita por un ácido el líquido pardo filtrado, se obtienen copos amorfos que, desecados é incinerados, contienen siempre cierta cantidad de potasa. Esta base está retenida con tal fuerza en esta seudocombinación, que resiste á los lavados, aun prolongados.

Se puede estudiar de un modo más cómodo esta seudocombinación empleando ácido húmico artificial.

Berthelot y André han demostrado que, si se agitan algunos gramos de este ácido con una solución de potasa al décimo, y si, al cabo de algunos días, se echa el magma en un filtro y se lava hasta desaparición de la alcalinidad, el ácido húmico ha fijado hasta el 9 por 100 de potasio, del cual sólo 1 por 100 puede quitársele por la acción del agua caliente. El ácido acético desaloja, en fin, la totalidad del metal; el ácido carbónico no lo elimina más que de un modo muy incompleto. La avidez del ácido húmico para la potasa es tal, que se puede, con su contacto, despojar casi enteramente de este álcali á una solución acuosa, aunque esté muy diluída. La sosa y la cal forman seudocombinaciones del mismo género.

Cuando se trata turba, ó una tierra vegetal poco rica en humus, por una solución diluída de potasa y se precipita por un ácido el líquido pardo filtrado, los copos que se forman contienen una proporción notable de nitrógeno, aun después de prolongadas lociones.

Cuando se pone el ácido húmico artificial en contacto con soluciones diluídas de amoníaco, se forman combinaciones análogas á las que da la potasa.

Así, la potasa y el amoníaco entran fácilmente en combinación con el humus natural ó artificial.

En resumen, los compuestos minerales que contiene el humus natural reconocen dos orígenes. Cierta proporción de

elementos fijos, que han formado parte constituyente de los vegetales durante su vida, se encuentra en el humus; el resto ha sido arrastrado por el agua pluvial: tal es el primer origen de las substancias fijas del humus. El segundo debe buscarse en el poder que posee la materia negra de fijar por absorción algunas de las sales que circulan en el suelo en estado de disoluciones muy diluídas, ya sea que estas sales procedan de descomposiciones químicas que afectan las rocas, ya que deriven de los abonos. Este segundo origen de elementos fijos no puede ponerse en duda teniendo en cuenta los experimentos realizados con el ácido húmico artificial que acabamos de mencionar.

Es imposible actualmente evaluar la parte que corresponde, por un lado, á los elementos minerales preexistentes en los vegetales primitivos que han servido para formar el humus y, por otro, á los elementos fijos que, procediendo del suelo, se han juntado con los primeros. ¿Cuáles son los más *móviles* de estos elementos, es decir, aquellos de que puede apoderarse más fácilmente la planta en su desarrollo? Esta pregunta queda sin respuesta. Desde el punto de vista práctico, el único que tiene un valor real, nos basta saber que el humus almacena materias nutritivas cuya mayor parte sirven para la alimentación del vegetal (PO^4H^3, K^2O, NH^3, etc.). Su papel más notable consiste en fijar temporalmente en el suelo estas substancias, que serán puestas en libertad de una manera gradual, subordinada á la mayor ó menor facilidad con que se oxidará el núcleo carbonado. El humus es, además, un factor importante del *poder absorbente de los suelos* de que pronto hablaremos, pero no se debe exagerar, sin embargo, su influencia como fijador de las substancias minerales disueltas en el suelo. Veremos, en efecto, que existe una categoría de silicatos, *las zeolitas*, cuya actividad respecto de esto es mucho mayor.

IV

CONSTITUCIÓN QUÍMICA DEL NÚCLEO NITROGENADO DEL HUMUS

De todas las substancias que contiene el humus natural, el nitrógeno es, indiscutiblemente, la más interesante. En la forma compleja que tiene cuando está, en cierto modo, anegado en la molécula carbonada, el nitrógeno es inactivo respecto de la mayoría de los vegetales. Por una serie de metamorfosis, de orden químico y de orden microbiológico, cuyas condiciones explicaremos ulteriormente, se desprende poco á poco y pasa sucesivamente al estado de amoníaco, de ácido nitroso y de ácido nítrico. Antes de estudiar las transformaciones que llevan al nitrógeno á estas últimas formas esencialmente difusibles, y que serán tratadas en el capítulo relativo á las acciones microbianas, conviene buscar cuál es la constitución problable del núcleo nitrogenado del humus.

El nitrógeno se encuentra en estado de amida.

Si designamos por R un radical alcohólico ó fenólico cualquiera (CH^3, C^2H^5, C^6H^5, etc), la fórmula más elemental de una amida será: $R.CO.NH^2$. Una amida puede ser considerada como una sal amónica, á la cual se han quitado (1) los elementos del agua:

$$R.CO.ONH^4 = R.CONH^4 + H^2O$$

Si llegamos, pues, á demostrar que el núcleo nitrogenado del humus es un núcleo amidado, comprenderemos que este núcleo, inutilizable por la planta en este estado de conden-

(1) Cuando se quita una molécula de agua á un ácido carboxílico monobásico, se forma una amida, tal ocurre cuando se calienta el acetato amónico en tubos cerrados:

$$CH^3.CO.ONH^4 = CH^3.CO.NH^2 + H^2O$$

Pero por acciones más enérgicas, en vez de una molécula se pueden quitar dos á la sal amónica, y en este caso se forma un compuesto que recibe el nombre de nitrilo:

$$CH^3.CO.ONH^4 = CH^3.CN + 2H^2O$$

El compuesto CH^3CN es el nitrilo del ácido acético.—C. B.

sación, no puede aprovecharla más que cuando habrá sufrido, por vía química ó microbiana, una *hidratación* capaz de convertirlo en sal amoniacal.

El siguiente experimento responde á esta cuestión:
Tratemos un peso conocido de tierra vegetal por un ácido, tal como el clorhídrico, en diversos estados de concentración, durante tiempos variables y á diferentes temperaturas. Acabada esta operación, filtremos y lavemos el precipitado en el filtro hasta que quede eliminado el ácido. Al líquido filtrado se adiciona lechada de magnesia en exceso y se destila: se recibe en un ácido valorado el amoníaco que se desprende. El residuo de esta destilación se deseca y luego se calcina con cal sodada: así se recoge cierta cantidad de nitrógeno en forma amoniacal, que llamaremos *nitrógeno amidado soluble*. Por fin, y como comprobación, desequemos el magma insoluble en el ácido clorhídrico, y anotemos su peso; luego, en una parte del mismo, determinemos el nitrógeno total. La suma de los pesos del nitrógeno, del amoníaco desprendido por la magnesia, del nitrógeno amidado soluble y del nitrógeno del magma, insoluble en el ácido clorhídrico, es sensiblemente igual á la del nitrógeno total contenido en la muestra primitiva. No se ha perdido, pues, nitrógeno en una forma desconocida en las manipulaciones.

Examinemos ahora el valor de las cifras que suministra semejante tratamiento.

Acción hidrolizante de los ácidos; formación de amoníaco.—He aquí un ejemplo de los resultados obtenidos con una tierra de la *Estación de química vegetal de Meudon*; esta tierra contenía 1,744 gramos de nitrógeno total por kilogramo de materia seca.

Se hicieron tres series de ensayos con un peso conocido de tierra (200 gramos de tierra en presencia de unos 400 centímetros cúbicos de líquido); la primera (I) con el ácido clorhídrico diluído en unas 110 veces su peso de agua, la segunda (II) con el ácido disuelto en unas 25 veces su peso de agua, la tercera (III) con el ácido disuelto en unas 14 veces su peso de agua. En cada serie, la *concentración del ácido era constante*, y se hacían variar la temperatura y la duración del contacto; las cifras que siguen se refieren á un kilogramo de tierra desecada á 110°.

Recordamos que el nitrógeno amoniacal inscrito en la ad-

junta tabla es el que ha desprendido, por destilación en contacto con la magnesia, el líquido ácido filtrado, y que el nitrógeno amidado soluble representa el nitrógeno que se desprende en estado de amoníaco cuando se calcina con cal sodada el residuo de la precedente destilación:

		Nitrógeno amoniacal (A)		Nitrógeno amidado soluble (B)	
		en 1 kg. de tierra	% del nitrógeno total	en 1 kg. de tierra	% del nitrógeno total
Después de un contacto de:					
I	α 18 horas en frío. .	0gr·0048	0,27	0gr·0277	1,58
	β 5 días en frío . .	0 0087	0,50	0 0302	1,73
	γ 2 horas á 100°. .	0 0488	2,79	0 1236	7,08
II	α 18 horas en frío. .	0 0144	0,82	0 0606	3,47
	β 5 días en frío . .	0 0214	1,22	0 0905	5,18
	γ 2 horas á 100°. .	0 1010	5,79	0 3569	20,46
III	α 18 horas en frío. .	0 0149	0,85	0 0686	3,93
	β 5 días en frío . .	0 0304	1,74	0 0965	5,53
	γ 2 horas á 100°. .	0 1241	7,11	0 4303	24,67

La inspección de estas cifras enseña que, por lo que se refiere al *nitrógeno amoniacal*, 1.°, la proporción de éste aumenta *con la riqueza en ácido clorhídrico* del líquido empleado para atacar la tierra: así, los números de la primera serie (columna A) son menores que los de la segunda serie, los cuales, á su vez, son menores que los de la tercera serie; 2.°, la proporción del nitrógeno amoniacal crece, para una misma proporción de ácido y una misma temperatura, *con la duración del contacto* de la tierra con el líquido ácido; 3.°, la proporción del nitrógeno amoniacal, para una misma concentración del ácido y una misma duración del contacto, *crece con la temperatura*.

Esta influencia de los tres factores, duración del contacto, concentración del ácido, temperatura, merece ser notada. En efecto, la urea $CO(NH^2)^2$, amida bien caracterizada, que, por fijación de 2 moléculas de agua, regenera el carbonato amónico, se comporta del mismo modo con los ácidos. En frío, y para un mismo tiempo de contacto, la proporción de urea que se transforma en carbonato amónico en presencia del ácido clorhídrico, por ejemplo, es tanto mayor cuando más concentrado es el ácido. Todas las amidas se comportan de la misma manera.

El núcleo nitrogenado del humus se comporta, pues, como una amida propiamente dicha. Al mismo tiempo que la proporción de nitrógeno amoniacal aumenta bajo la influencia de los tres factores antes estudiados, la proporción del nitrógeno que hemos llamado

nitrógeno amidado soluble (columna B) aumenta paralelamente bajo la influencia de los mismos factores, sin que haya, sin embargo, proporcionalidad entre la formación del amoníaco y la del nitrógeno amidado soluble (Berthelot y André, 1887).

Dada la presencia constante del nitrógeno en el humus, se puede preguntar si será posible *separar* la materia hidrocarbonada del humus de la materia carbonitrogenada. Hasta ahora, esta separación nunca ha sido intentada con éxito. En el vegetal vivo, los principios carbonados y no nitrogenados son, ante todo, celulosas ó materias azucaradas: los principios carbonados y nitrogenados, principalmente albuminoides. Se puede, cuando se ha determinado el carbono y el nitrógeno totales en la materia seca de un vegetal, deducir, á lo menos aproximadamente, de la cantidad del nitrógeno la de albuminoides que existían en la planta. Se podría aplicar el mismo cálculo al humus y suponer que el nitrógeno de éste corresponde á una materia que aun tiene la forma de albuminoide. Este albuminoide *húmico* estaría así asociado, en la materia orgánica de los suelos, con cierta cantidad de ácido húmico (no nitrogenado) próximo, por su composición y sus propiedades, al ácido húmico artificial. Señalamos simplemente esta aproximación, pero sin insistir en ella: se comprenden los caracteres aleatorios que presenta semejante especulación.

El *agua sola* puede actuar sobre la materia orgánica para transformar en amoníaco una fracción de este nitrógeno complejo. Hébert (1889) ha demostrado que, si se calienta una tierra húmeda á más de 100°, se produce siempre, *por una acción puramente química*, cierta cantidad de amoníaco procedente de la fijación del agua en los compuestos amidados, y que su proporción aumenta con la duración de la calefacción.

Acción hidrolizante de los álcalis: formación de amoníaco.—Haciendo actuar los álcalis sobre la tierra de labor, se obtiene una acción hidrolizante análoga á la que produce el ácido clorhídrico. Para ello se calienta en un matraz un peso conocido de tierra con potasa diluída (1/10) durante doce horas. Mediante una corriente de hidrógeno se arrastra, á medida que se forma, el amoníaco producido en esta hidro-

lisis; se recoge este gas en un ácido valorado. El magma, de donde se ha desprendido este amoníaco, contiene todavía una fuerte proporción de nitrógeno (unos 75 por 100) que la potasa ha solubilizado y que es fácil determinar. Por último, cierta cantidad de nitrógeno queda insoluble en el residuo. La suma de estas tres formas del nitrógeno es sensiblemente igual á la cantidad total de nitrógeno de la muestra primitiva.

Aquí también encontramos francamente *el carácter amidado* del nitrógeno contenido en la tierra de labor. La proporción del nitrógeno solubilizado por la potasa varía con el tiempo que se calienta (Berthelot y André).

Si se trata *en frío* la tierra por una solución concentrada de potasa, se desprende amoníaco; pero este desprendimiento se produce con gran lentitud, subordinada á la misma lentitud de la hidratación de las amidas.

Teníamos razón al decir al principiar que la materia orgánica nitrogenada del suelo se comporta como un complejo en el núcleo del cual se hallan amidas muy condensadas, insolubles, que la acción de los ácidos ó de los álcalis hidroliza poco á poco, y cuyo término nitrogenado final de descomposición más sencillo parece ser el amoníaco, sin que se pueda, en momento alguno, observar desprendimiento de nitrógeno gaseoso. Si, en fin, se determina á la vez el carbono que se encuentra en cada uno de los productos del desdoblamiento efectuado por la potasa y se compara la cifra que se obtiene con la del nitrógeno correspondiente, se puede enunciar la ley siguiente que es general en todos los desdoblamientos: la fijación del agua que se efectúa bajo la influencia de los álcalis transforma el núcleo orgánico insoluble del humus en compuestos solubles menos condensados, siendo los compuestos condensados á la vez los menos solubles, los más pobres en nitrógeno y los más ricos en carbono.

Se observan fenómenos análogos á los que acabamos de describir en todas las tierras. Si se comparan entre sí las cifras obtenidas con humus de diversos orígenes: buena tierra de labor, mantillo ordinario, turba, tierra de brezo, que se sometan á un tratamiento alcalino idéntico (la misma concentración, la misma temperatura, la misma duración de la acción) seguido de un idéntico tratamiento con el ácido clorhídrico, se llega á la conclusión de que la proporción del nitrógeno finalmente solubilizado es aproximadamente la misma cuando el ciclo de las reacciones ha terminado (unos 95 por 100 del nitrógeno total). Estos diversos humus no difieren entre sí más que por la manera como se comportan en los estadios intermedios: un humus será más sensible á la acción de los álcalis que otro. Pero,

desde el punto de vista de la solubilización final del nitrógeno. no hay diferencia (G. André).

Productos intermedios obtenidos en la descomposición del humus por los ácidos.—Tratando la turba del Michigán por los ácidos clorhídrico ó sulfúrico, Jodidi (1910), mediante reacciones específicas conocidas, ha podido caracterizar, entre los productos de esta descomposición, la presencia del amoníaco, así como la de *ácidos amidados, ácidos monoamínicos* y *ácidos diamínicos*. En estas dos últimas categorías de ácidos, el autor ha encontrado cuerpos análogos al ácido aspártico, á la leucina, á la histidina, á la arginina, á la lisina. Robinson (1911) ha aislado de dos muestras de suelos turbosos, tratados por los ácidos, dos ácidos amínicos bien conocidos: la leucina y la isoleucina.

Estos ensayos, que completan de una manera afortunada los que hemos explicado antes, demuestran muy claramente que la hidrolisis de la materia nitrogenada contenida en la tierra vegetal engendra substancias próximas, si no idénticas, á las que suministran los albuminoides propiamente dichos.

Acciones químicas naturales que simplifican el nitrógeno complejo del humus.—En las condiciones ordinarias, los agentes principales que atacan á la materia nitrogenada del humus son seres vivos. Veremos más tarde su modo de acción. Pero, no debe olvidarse que la *reacción del medio* ejerce una influencia capital: no hay formación de amoníaco, á lo menos en cantidades notables, y nitrificación ulterior de este amoníaco, más que cuando el suelo contiene calcáreo. La práctica del encalado y la del margado tienen por objeto, ya sea provocar, si el suelo es ácido, ya de acelerar si el suelo ya es algo calcáreo, esta descomposición del núcleo nitrogenado complejo. Entonces hay que preguntar si los reactivos cálcicos así introducidos en el suelo (cal viva, carbonato cálcico) poseen un poder descomponente químico propio, independiente de la presencia de microorganismos que convierten el nitrógeno amidado complejo en nitrógeno amoniacal. En caso afirmativo, se podrá deducir que las transformaciones que hacen sufrir estos agentes á la materia nitrogenada se acercan á las de los álcalis enérgicos (potasa) cuyo estudio hemos hecho antes. Y precisamente esto es lo que ocurre.

Boussingault determinó una vez las cantidades de amoníaco formadas en una tierra encalada, según las cantidades de cal añadidas y según la duración del contacto. El procedimiento de determinación del amoníaco empleado por Boussingault no está al abrigo de objeciones; por esto las cifras adjuntas no tienen más que un valor comparativo:

Cal empleada por kilogramo de tierra	Duración del contacto	NH^3 formado
0	1 mes	0,0050 gr.
0,3 gr.	6 días	0,0120 »
10 »	2 días	0,0340 »
10 »	1 mes	0,0760 »
10 »	2 meses	0,0790 »

Resulta del examen de estas cifras que, al cabo de un tiempo bastante corto, aun cuando las proporciones empleadas sean escasas, la cal determina por su contacto con la tierra vegetal una notable formación de amoníaco. Pero, cuando el exceso de cal es considerable, los fenómenos biológicos quedan suspendidos—especialmente la nitrificación,—mientras que el desprendimiento de amoníaco es muy pronunciado. La nitrificación vuelve á efectuarse cuando la causticidad de la cal disminuye á causa de su combinación con el ácido carbónico. Esta acción química de la cal es todavía más profunda sobre el estiércol ó sobre los abonos verdes que en el suelo. Se puede adelantar—y esto está por otra parte de acuerdo con lo que se observa en la práctica—que la simplificación del nitrógeno complejo contenido en estos abonos es tanto más rápida cuanto más íntimo es su contacto con la cal. Si las condiciones de la nitrificación, que examinaremos más tarde, están realizadas, resultará que la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno nítrico es notablemente acelerada por el encalado, el cual da lugar á la formación de amoníaco. Tal rapidez en la producción del amoníaco, y después del ácido nítrico, no debe temerse más que en el caso en que la vegetación no pueda aprovecharse de esta solubilización del nitrógeno: en efecto, el ácido nítrico, ó mejor el nitrato cálcico, sería entonces llevado por las lluvias al interior del suelo y luego arrastrado por las aguas de infiltración.

Aun cuando actúe con menos energía que la cal viva, el carbonato cálcico ejerce, sin embargo, una acción muy apreciable; hasta tiene á menudo la ventaja de *movilizar* cantidades de nitrógeno, sin duda menos considerables, pero que, por esto mismo, están menos expuestas á las pérdidas debidas al agua de infiltración.

En realidad, se trata siempre, en semejantes acciones, de una *hidrolisis* de la materia nitrogenada; esta hidrolisis es tanto más rápida y tanto más profunda en cuanto es producida por agentes más enérgicos y á una temperatura más elevada.

Absorción y emisión de amoníaco por la tierra de labor. — De los hechos precedentemente estudiados, se deduce una consecuencia. Ya que existen reacciones químicas y microbianas que convierten en el suelo el nitrógeno complejo del humus en nitrógeno amoniacal, ¿qué ocurre cuando no se efectúa la nitrificación?; ¿se desprende el amoníaco en estado gaseoso en la atmósfera?.

Cuando se examinan las relaciones del amoníaco con el suelo, son posibles dos acciones: el amoníaco atmosférico (pág. 85) es absorbido por el suelo, puede nitrificarse si se hallan realizadas las condiciones del fenómeno nitrificador, concurriendo así á la alimentación nitrogenada de las plantas. En realidad, se puede hacer absorber artificialmente á una tierra proporciones bastante notables de amoníaco, ya sea haciendo pasar por esta tierra una corriente de este gas, ya poniéndola en contacto en un vaso cerrado con una atmósfera cargada de amoníaco. Pero, inversamente, una tierra así saturada, *por fuerza*, pierde rápidamente la mayor parte del gas que ha absorbido cuando se la expone nuevamente al aire libre, ó cuando se hace circular en su superficie una corriente de aire. En las condiciones naturales, ocurren los dos fenómenos: el amoníaco atmosférico es absorbido por el suelo en una proporción que varía con la existencia de muchos factores, de los cuales el principal es la composición del suelo. Recíprocamente, si el amoníaco producido en el interior del suelo por las acciones químicas y microbianas no ha sido nitrificado, pasa, á lo menos parcialmente, á la atmósfera. Parece que este último fenómeno es el más frecuente, y aunque normalmente su intensidad es débil, no deja de ser verdad que este desprendimiento de amoníaco es capaz de hacer perder al suelo cierta cantidad de nitrógeno. Una parte del amoníaco atmosférico sería, pues, debido al amoníaco que del suelo se exhala. He aquí la demostración:

Un kilogramo de una tierra que no había recibido abonos desde muchos años, fué tomado de la superficie de una de las parcelas de cultivo de la Estación de química vegetal de Meudon, después de una serie de días de lluvia. Esta muestra contenía 171 gramos de agua (pérdida á 100°); se la puso en un frasco atravesado por una

corriente de aire (6 litros por hora) que burbujeaba á través de una solución diluída de ácido sulfúrico valorado. La proporción de amoníaco obtenida llegó 0,012 gr. (para un kilogramo de tierra suponiéndola seca), siendo el error de la determinación en este caso de 0,006 gr. en más ó en menos.

Un kilogramo de tierra tomado en el mismo sitio, á 0,25 m. de profundidad, que contenía 142 gr. de agua, fué tratado de la misma manera. Se encontró: NH^3 desprendido = 0,035 mgr. Así, pues, en este punto, la capa superficial, lejos de haber tomado amoníaco á la atmósfera, había, por el contrario, cedido cierta cantidad de este álcali libre, contenido en las capas más profundas (Berthelot y André, 1887).

La emisión del amoníaco por el suelo es, pues, un fenómeno general que depende de muchos factores: temperatura, grado de humedad, de alcalinidad y de permeabilidad del suelo, riqueza de éste en nitrógeno total. Es probable que, al aire libre y en las condiciones naturales, esta emisión no sea siempre uniforme. Si la temperatura del suelo es más baja que la del aire ambiente, el desprendimiento debe disminuir; tal vez llega á anularse de momento y es substituído por el fenómeno inverso de la absorción del amoníaco aéreo por el suelo. Pero, cuando la temperatura del suelo es más elevada que la del aire, la emisión del amoníaco vuelve á empezar.

Existen pequeñas cantidades de amoníaco en el suelo, hasta bastante profundidad. Se puede determinar este amoníaco mediante el procedimiento de Longi, de que hablaremos á propósito del análisis químico. A fin de invierno, hacia el mes de abril, la cantidad de esta base varía con la altura á que se toma la muestra y aumenta con la profundidad. Es probable que la nitrificación, poco intensa en aquella época del año, no ha transformado aún en nitrógeno nítrico todo el nitrógeno amoniacal que procede de la descomposición de la materia nitrogenada en la superficie del suelo. Una pequeña porción de este amoníaco avanza hacia el interior y puede pasar á las aguas de infiltración, como ha sido comprobado con frecuencia; otra porción, mucho más importante, es retenida por la materia en las capas superiores del suelo. Al terminar el período de calor (octubre), la cantidad de amoníaco que se encuentra en las diferentes capas del suelo es mucho menor que al principio de la primavera á causa de la nitrificación de esta base á medida que ha ido formándose. Por otra parte, esta proporción de amoníaco es siempre escasa y, como veremos á propósito de la composición de las aguas de infiltración, la cantidad de álcali arrastrado por estas aguas es despreciable con relación á la del ácido nítrico (G. André, 1903).

Olor propio de la tierra. — Cuando la tierra está mojada, principalmente á causa de una lluvia tempestuosa y siendo la temperatura poco elevada, despide un olor aromático.

Berthelot y André (1892) han demostrado que el principio esencial de este olor es debido á un compuesto orgánico neutro, que es arrastrado por el vapor del agua de la misma manera que las substancias cuya tensión es pequeña. Si se calienta tierra ligeramente húmeda en un alambique, calentado en bañomaría á unos 60°, se obtiene un líquido acuoso dotado de un olor aromático bastante vivo. Rectificando el líquido así obtenido y recogiendo aparte las primeras porciones, el olor de éstas es mucho más pronunciado, pero no deja por esto de tener olor el residuo de la destilación. El producto acuoso volátil es alcalino, contiene amoníaco y reduce el nitrato de plata amoniacal; en contacto con carbonato potásico forma un anillo resinoso.

El agua arrastra, pues, en la destilación muchas substancias. ¿Hay sólo una materia aromática? Es imposible afirmarlo. Según Rullmann y Salzmann, el olor propio de la tierra sería debido á la presencia de un organismo microscópico: *Streptothrix odorifera* (*Actinomyces odorifer*), y existiría una relación entre la constitución química de las materias carbonadas apropiadas para su desarrollo y la aparición del olor. Tal vez este producto volátil contenga *toxinas*, á las cuales se ha hecho desempeñar en estos últimos años un importante papel en los fenómenos de intoxicación del suelo. Este envenenamiento permitiría explicar, según algunos autores, por qué ciertas plantas rehusan vegetar en la misma parcela de tierra durante un período de tiempo algo largo. Volveremos á tratar más adelante de este punto especial.

Según Rohland, el olor que presentan ciertas arcillas, y que varía con su naturaleza, debe atribuirse á la presencia en estas substancias de indicios imponderables de materias orgánicas.

V

ATMÓSFERAS CONFINADAS DE LOS SUELOS; VARIACIONES DE LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES

En diferentes ocasiones hemos insistido en la necesidad de la circulación en el suelo de los gases del aire. *El trabajo del suelo* tiene principalmente por objeto asegurar á la tierra de

labor una provisión suficiente de oxígeno, capaz de satisfacer las exigencias respiratorias de las raíces. Pues por lo mismo que absorben oxígeno, emiten las raíces gas carbónico; además, la presencia del oxígeno provoca la combustión más ó menos rápida de la materia orgánica: ya sea esta combustión de orden puramente químico ó que se efectúe por mediación de microorganismos.

Resulta de esto que los gases contenidos en el suelo deben enriquecerse en ácido carbónico, y que la proporción de este gas será tanto más elevada cuanto más intensas sean las combustiones internas. Este es un fenómeno de grande importancia.

La cuestión que se presenta es, pues, saber cuál puede ser la proporción del gas carbónico que contiene la atmósfera interior del suelo, y cómo varía la composición de esta atmósfera en los diversos suelos, según su cultivo y según la cantidad de materias orgánicas que contengan. *A priori,* deben haber cambios continuos entre esta atmósfera y el aire exterior; porque, si fuese de otro modo, el gas carbónico se almacenaría en tales proporciones, que las raíces no podrían respirar: quedaría suspendida toda vegetación. Esto es lo que se observa en algunos casos, según expondremos más adelante.

No nos ocuparemos, en lo que sigue, de los *agentes* que producen el desprendimiento del gas carbónico en el suelo; estos agentes son de orden químico y, sobre todo, de orden fisiológico. Sólo examinaremos la *resultante* de los fenómenos de oxidación.

Naturaleza, determinación y variaciones de los gases en los suelos.—Experimentos de Boussingault y Lewy.—Se deben á Th. de Saussure las primeras investigaciones relativas al papel comburente que desempeña el oxígeno en los suelos. Habiendo introducido mantillo en una campana llena de aire, el sabio fisiólogo observó, al cabo de algunos días, que el oxígeno había sido parcialmente reemplazado por gas carbónico sin cambio de volumen: había habido, pues, combustión del mantillo.

Boussingault y Lewy emprendieron, en 1852, un estudio

de conjunto respecto de la circulación y la composición de los gases del suelo en condiciones muy variadas. Resumamos estos experimentos, cuyas conclusiones han sido siempre confirmadas por los numerosos trabajos hechos posteriormente sobre este asunto.

El procedimiento de extracción de los gases empleado por los autores precitados, consiste esencialmente *en aspirar muy lentamente* el aire contenido en el suelo, mediante la siguiente disposición: un tubo de vidrio de algunos milímetros de diámetro, se adapta por una de sus extremidades á un pico de regadera provisto de agujeros en toda su superficie y lleno de cascajo silíceo, para llenar su interior sin dificultar la circulación de los gases. Se entierra este aparato á cualquier profundidad, veinticuatro horas antes de principiar el experimento, y se apisona fuertemente la tierra alrededor del tubo, formando un montón. Un aspirador de agua extrae los gases del suelo: éstos, al salir del tubo unido al pico de regadera, pasan por dos frascos lavadores, que contienen agua de barita, destinados á retener el ácido carbónico. Del peso del carbonato bárico obtenido se deduce el peso del gas carbónico contenido en el volumen gaseoso igual al del agua salida del aspirador hechas las correcciones de presión y de temperatura. A fin de averiguar exactamente la composición de la atmósfera interior del suelo, se interpone, antes de los dos frascos de agua de barita, un pequeño matraz provisto de dos llaves, en el cual se ha hecho previamente el vacío. Así se podrá, mediante un análisis eudiométrico, determinar la proporción de oxígeno contenido en el gas de esta atmósfera interior.

He aquí algunos de los resultados obtenidos por Boussingault y Lewy.

Un suelo arenoso, ligero, fué abonado con estiércol medio podrido, á razón de 600 quintales por hectárea. Al cabo de seis días se dispuso el aparato en medio del campo, poniendo el pico de regadera á la profundidad de 35 centímetros. Transcurridas cinco horas (habiendo pasado un volumen de aire = 5232 centímetros cúbicos), se encontró: $CO^2 = 2,17$ en 100 partes de aire confinado. Una hora después de esta primera determinación, como principiaba á llover, se hizo una segunda determinación en el mismo sitio. Al cabo de doce horas, se encontró: $CO^2 = 2,25$ en 100 volúmenes de aire confinado. Cuatro días después, habiendo sido muy frecuentes las lluvias, se hizo en el mismo sitio un nuevo ensayo: al cabo de tres horas y media se obtuvo $CO^2 = 9,74$.

Siendo la cantidad de oxígeno contenida en el aire atmosférico, en volumen, aproximadamente 20,90, la determinación de este gas en las atmósferas confinadas permitirá saber si la suma $O + CO^2$ es igual, inferior ó superior á esta cifra. Si esta suma es igual á 20,9 es verosímil que el oxígeno habrá simplemente quemado el carbono

del humus, porque el gas carbónico contiene su propio volumen de oxígeno; si esta suma es mayor que 20,9, el exceso de gas carbónico será debido á un desprendimiento, atribuíble á una fermentación pútrida. Si esta suma es inferior á 20,9, deberá deducirse que cierta cantidad de hidrógeno se ha quemado al mismo tiempo que el carbono. Boussingault y Lewy han encontrado que este último caso era el más frecuente.

Citemos, además, las siguientes cifras: el aire confinado á 35 centímetros de profundidad en un campo de zanahorias, contenía, en volumen, 1,03 de CO^2; el aire confinado á 35 centímetros de profundidad en una viña que no había recibido abonos desde tres años, contenía $CO^2 = 0,86$; el aire confinado en una tierra de bosque, en tiempo lluvioso del mes de septiembre, contenía, á 35 centímetros de profundidad, 0,83 de CO^2 en volumen.

Todos estos análisis demuestran que el aire confinado en la tierra posee siempre una composición diferente de la del aire atmosférico; se encuentran en él proporciones de gas carbónico mucho más elevadas que deben atribuirse á fenómenos especiales de combustión. Éstos son especialmente evidentes en el caso en que el suelo ha recibido recientemente un abono formado por estiércol. Se puede comprobar con exactitud este hecho haciendo las tomas de gas en el seno de una mezcla, por ejemplo, de tierra vegetal y mantillo, bien regados con agua. Según Boussingault y Lewy, la medida del gas carbónico contenido en los suelos cultivados, que no han recibido abonos desde un año, da la cifra de 9 litros de CO^2 por metro cúbico de aire confinado, es decir, de 22 á 23 veces más que el gas carbónico que existe en el aire normal. En un suelo recientemente abonado se han encontrado 98 litros por metro cúbico, ó sea unas 250 veces el gas que contiene el aire normal.

Influencia de ciertos factores en la producción del gas carbónico.— El trabajo del suelo, renovando constantemente las superficies de aereación, acelera la combustión del humus. Ebermeyer (1878) encontró que la atmósfera interna de un campo continuamente esponjado contenía 4 ó 5 veces más gas carbónico que el suelo de un bosque y, sin embargo, este último suelo lleva una rica cubierta de materias orgánicas en descomposición.

La proporción del gas carbónico que circula en el suelo no es siempre proporcional á la de las materias orgánicas que contiene. Según Wollny, esta proporcionalidad no existe; la cantidad de ácido

carbónico contenido en un suelo, crecería menos aprisa que su riqueza en elementos orgánicos; hasta podría llegar á ser constante á causa del retraso que un exceso de gas produciría en el trabajo de ciertos microbios. Si la proporción de la materia orgánica tiene alguna influencia en la formación del gas carbónico, las condiciones físicas de humedad y de temperatura intervienen también para acelerar ó para retardar las oxidaciones. Existe en este caso, como en el de todos los fenómenos que dependen de seres vivos, una proporción de humedad y un grado de temperatura óptimos. Wollny ha demostrado, por lo demás, que la combustión de la materia orgánica de los suelos no era exclusivamente obra de microorganismos: la tierra esterilizada por el calor, ó sometida á la influencia de un anestésico, todavía desprende gas carbónico; sin embargo, este desprendimiento es mucho más débil que en la misma tierra tomada en estado normal. Después de haber recogido y analizado los gases confinados del suelo durante los diferentes meses de los años 1874 y 1875, el citado autor formuló la conclusión siguiente: la proporción del gas carbónico aumenta con la temperatura, suponiendo, sin embargo, que existe una proporción suficiente de humedad. Fleck ha llegado, relativamente á la acción de la temperatura sobre la oxidación de la materia orgánica, á resultados análogos á los de Wollny: la cantidad del gas carbónico producido en el interior de los suelos crece paralelamente á la elevación de la temperatura de enero á agosto, después decrece luego. Risler (1872-1873), operando en Calèves (Suiza), ha dado, respecto de la influencia de este factor, los siguientes datos:

		á 25 centímetros de profundidad	á 1 metro de profundidad
Media de las proporciones por 100 de gas carbónico correspondientes á cinco temperaturas	Las más bajas:	0,37	0,57
	Las más altas:	0,65	1,74

Pero, por otra parte, las tierras arenosas que se desecan rápidamente, ó que se apoyan en un subsuelo permeable, dejan de producir ácido carbónico cuando, por causa de una elevación demasiado considerable de temperatura, la cantidad de agua que contienen baja á más de cierto límite. Recíprocamente, en una tierra arcillosa embebida de agua, la oxidación podrá quedar suspendida y podrán presentarse en ella fenómenos reductores. En principio, las tierras llamadas *arcillosas* son tanto menos permeables cuanto más elevada es la proporción del coloide; también son muy á menudo muy lentos los fenómenos de oxidación en estas tierras. Según Wollny, la presencia de ciertas sales solubles favorece la oxidación de la materia orgánica, porque estas sales sirven de alimento á los microorganismos. En efecto, en una tierra lavada, las oxidaciones se retardan. Por el contrario, cuando las disoluciones del suelo son demasiado

concentradas, dificultan la acción de los mismos microorganismos y el desprendimiento gaseoso disminuye. Los elementos nitrogenados que contiene la tierra de labor, sobre todo cuando son fácilmente descomponibles, favorecen la formación del gas carbónico; el medio desprovisto de calcáreo, en el cual se halla la molécula nitrogenada de las tierras ácidas, opone á la oxidación microbiana un gran obstáculo.

Resulta de lo que precede que, entre los factores que ejercen mayor influencia en la producción del gas carbónico en el interior de los suelos, deben ponerse en primer término la temperatura y la humedad, admitiendo que la constitución física del suelo sea tal que asegure un grado de permeabilidad compatible con una buena circulación de los gases y del agua. Hemos definido antes cuáles eran las condiciones que regían esta circulación.

Veremos, á propósito del estudio especial de los microorganismos oxidantes, hasta qué límite se debe ejercer verosímilmente su acción y cuál es la fracción del gas carbónico que, en tal ó cual intervalo de temperatura, es atribuíble á su sola presencia. Actualmente, no nos ocuparemos más que en el fenómeno de oxidación tomado en conjunto é independientemente de las causas que lo provocan. La oxidación de la materia orgánica debe variar, pues, en gran escala en los diversos puntos del globo. Rápida en las regiones cálidas y húmedas, disminuye cuando la temperatura media baja: esto es lo que explica la acumulación del humus en las comarcas frías ó en las grandes alturas. Además, en este último caso, la presencia del agua, en cantidad notable, constituye un obstáculo para la oxidación, porque esta agua, evaporándose más difícilmente, recubre la masa orgánica y restringe mucho sus relaciones con el oxígeno del aire.

Sin embargo, no debe perderse de vista que, si la temperatura desempeña un papel preponderante, la proporción de humedad, como ya hemos dicho antes, también interviene. Puede, pues, ocurrir que, en las regiones tropicales, por ejemplo, el máximo de oxidación de la materia orgánica no coincida con la mayor elevación de temperatura más que si el suelo contiene una fuerte proporción de agua, ó bien si recibe aguas meteóricas.

Los datos proporcionados por los análisis físico y químico de un suelo indican de una manera satisfactoria el grado de permeabilidad de este suelo, su riqueza en materia orgánica y las formas en que se halla el nitrógeno en su masa. Mediante estas indicaciones, se podrá, pues, conocer aproximadamente con qué rápidez el carbono del humus, y el de los abonos orgánicos complejos, desaparecerán por oxidación.

Experimentos de Schlœsing hijo y de Mangin. —Á fin de evitar las objeciones hechas al método de Boussingault y Lewy — apertura de una cavidad en el suelo, aplicación del tubo y cierre de la cavidad, desmoronamiento de la tierra

capaz de activar la combustión del humus, — Schlœsing hijo (1887) hizo penetrar en el suelo, á la profundidad deseada, un tubo de acero rígido, de 10 milímetros de diámetro exterior y de 1 á 2 milímetros de diámetro interno, cuya extremidad inferior es cónica para facilitar la introducción. Esta parte cónica está, después de hundido el tubo, en contacto íntimo con la tierra é impide toda comunicación entre las atmósferas externa é interna.

En el momento de su penetración en el suelo, se evita la obstrucción del tubo poniendo en su canal un alambre de acero. Cuando el tubo está ya colocado, se enlaza su extremidad superior, por medio de un tubo capilar de vidrio, con una ampolla de 15 centímetros cúbicos llena de mercurio, que comunica con un pequeño recipiente. Bajando el recipiente, la ampolla se llena de los gases procedentes del suelo; se suelda á la lámpara y después se analiza su contenido. Cuando se toman, por este procedimiento, dos ó tres muestras de gas en el mismo punto, sin cambiar de sitio el tubo de acero, se encuentra que tienen la misma composición.

El autor, de acuerdo en esto con Boussingault y Lewy, comprobó la abundancia del oxígeno en el suelo propiamente dicho; en el subsuelo mismo se encuentra, generalmente, una abundante provisión de este gas. He aquí algunas cifras relativas á análisis hechos en herbazales, donde parecería más probable encontrar máximos de gas carbónico y mínimos de oxígeno.

	Profundidad (Metros)	CO^2 %	O %
Herbazales del Calvados; 8 de junio; tiempo cálido.	0,35	3,54	»
26 de septiembre; tiempo fresco. . .	0,30	0,90	»
	0,55	1,35	»
Herbazales del Calvados; 26 de septiembre; tiempo fresco	0,20	0,65	»
	0,40	0,95	»
Otros sitios; 8 de junio; tiempo cálido.	0,30	8,72	14,33
	0,60	8,80	13,21
24 de septiembre; tiempo fresco; viento apreciable.	0,25	0,45	»
	0,50	1,40	»

De una época á otra, la composición de la atmósfera de un mismo suelo puede experimentar variaciones considerables, como se ve

aquí. Pero, si la riqueza en gas carbónico oscila en realidad entre 0,4 y 10 por 100, la de oxígeno nunca ha descendido á menos de 10. Esta riqueza en gas carbónico varía, en un mismo sitio y á una misma profundidad, con la época del año en que se ha tomado la muestra de gas; los movimientos de la atmósfera exterior, los cambios de temperatura, las oscilaciones barométricas, influyen en la riqueza del suelo en este gas. El *declive del suelo* interviene generalmente: el gas carbónico está en mayor proporción en los puntos más bajos de un terreno, como si descendiese á causa de su elevado peso específico.

Resulta igualmente de las cifras que anteceden, que la cantidad de gas carbónico es más considerable á medida que se penetra más adentro en el suelo; sin embargo, se observa á veces el fenómeno inverso. Schlœsing hijo lo explica de la siguiente manera. Después de un período de vientos, acompañado de variaciones barométricas capaces de renovar la atmósfera interna hasta cierta profundidad, pueden presentarse fuertes calores con tiempo de calma. En el suelo, más caliente y más rico en materia orgánica fácilmente oxidable, la producción del gas carbónico aumenta, sobre todo si este suelo es húmedo y si los cambios de gases con la atmósfera exterior son restringidos á causa de la misma calma de ésta. Se comprende que las capas superiores del suelo contengan entonces una proporción de gas carbónico mayor que las capas inferiores.

Mangin (1889-91) escogió otro punto de vista en sus investigaciones sobre las atmósferas internas. Aun en los casos en que la proporción de oxígeno incluído en el suelo parecería suficiente para subvenir á la respiración de las raíces, la presencia de cantidades notables de gas carbónico ¿no tendría una influencia nefasta en la vitalidad de ciertas plantas? Para resolverlo, el autor estudió la manera como se comportan los árboles de París respecto de la aereación del suelo donde penetran sus raíces. Las tomas de gas se efectúan mediante una sonda hueca, provista de un mandril destinado á asegurar la permeabilidad del taladro durante la penetración de la sonda á la profundidad deseada. Cuando se retira el mandril, éste actúa como un pistón y los gases llenan el taladro. Inmediatamente después de la extracción del mandril, se cierra una llave situada en la parte superior de la sonda, donde se atornilla una pequeña bomba. Se abre la llave, se extrae mediante la bomba cierto volumen de aire y se analiza éste por los procedimientos conocidos.

Mangin compara entre sí los gases del suelo recogidos en diferentes puntos de un jardín público (Luxemburgo), en el cual se pueden encontrar todos los grados de aereación, por efecto de la existencia ó de la ausencia de apisonamientos producidos por los pies de los paseantes.

En los parterres, donde el suelo está esponjado por los trabajos de los jardineros, la aereación es muy satisfactoria: la media del gas carbónico encontrado a 50 centímetros de profundidad es de 0,7 por 100; el oxígeno es, pues, abundante. En el suelo de las *pelouses*, que es raramente removido, pero que no está apisonado, se encuentra, aun en verano, una proporción de gas carbónico que no excede de 2 por 100, á excepción de un solo caso en que llega á 5,3 por 100: aun aquí la aereación es satisfactoria. En el suelo de los paseos, que sin cesar son apisonados por los paseantes, y en el cual solamente una pequeña superficie es removida al pie de los árboles para abrir los hoyos de riego, la aereación no es tan buena, si bien que la proporción de CO^2 no ha pasado nunca de 5 por 100.

En realidad, á pesar de las dificultades de la renovación de la atmósfera interna á causa del apisonamiento de la superficie del suelo, existe en el seno de la tierra, aun á la profundidad de 90 centímetros, una suficiente cantidad de oxígeno que basta para las necesidades de las raíces.

Otra comparación hizo Mangin, relativa á la composición de las atmósferas confinadas debajo del asfalto de los *boulevards*, y al pie de los árboles protegidos del pisoteo mediante enrejados de fundición. Los suelos asfaltados, y provistos de un enrejado al pie de los árboles, presentan algunas ventajas sobre los suelos apisonados desde el punto de vista de su riqueza en oxígeno. Sin embargo, si el asfalto impide el apisonamiento del suelo, se opone á la renovación del aire. Solamente en el suelo subyacente al enrejado, ya puede efectuarse esta renovación, como lo demuestran las cifras obtenidas en el análisis de los gases; á 1 metro de distancia del borde del enrejado, debajo del asfalto, se encuentra frecuentemente una elevada proporción de gas carbónico, como se ve en las siguientes cifras:

	CO^2 encontrado en 100 volúmenes de gas	
	en el sitio del enrejado	á 1 metro del enrejado
29 de julio	1,03 (á 0,50 m. de prof.)	10,20 (á 0,25 m. de prof.)
	1,82 (á 0,70 m. de prof.)	9,09 (á 0,70 m. de prof.)

El oxígeno se encuentra, pues, en proporciones bastante débiles en los suelos asfaltados, mientras que la proporción del gas carbónico es muy elevada. Uno de los inconvenientes que tiene la falta de aereación de los suelos se manifiesta por el retraso que experimentan en abrirse las yemas de los árboles. Sin embargo, cuando el sistema radicular comprende cierto número de raíces horizontales superfi-

ciales, el árbol sufre menos: tal es el caso del *castaño de Indias*. También debe citarse entre las causas de la mortalidad de los árboles de las ciudades, la presencia en el suelo de gases tóxicos (gas del alumbrado).

Se puede, pues, *en resumen,* admitir que, en una buena tierra de labor convenientemente trabajada, la aereación siempre es suficiente en la profundidad á que penetran las raíces. Si, á causa de una aplicación de estiércol cuya combustión será favorecida por la elevación de la temperatura, la proporción del gas carbónico se eleva de una manera notable, los cambios gaseosos con la atmósfera exterior restablecerán pronto el equilibrio y el oxígeno nunca faltará á este suelo. No sucede lo mismo cuando se trata de un suelo no trabajado y apisonado, sobre todo si este apisonamiento es permanente, como en el caso del suelo de los paseos ó de los *boulevards:* así, el vigor del árbol y su existencia misma están subordinados á la facilidad mayor ó menor con que el oxígeno, por una parte, puede penetrar en las inmediaciones del pie del árbol, y el ácido carbónico, por otra parte, puede salir á la atmósfera exterior. Pero este defecto de aereación no es perjudicial á todos los árboles de la misma manera.

Combustión de la materia orgánica en el subsuelo.— El subsuelo contiene casi siempre cierta cantidad de materia orgánica, cuya combustión es mucho más lenta que la del suelo. Schlœsing, á quien debemos algunas observaciones respecto de este punto, llenó dos frascos iguales, de unos 2 litros de cabida, el uno de tierra del suelo, el otro de tierra del subsuelo, tomada en el mismo sitio (de 0,60 á 0,70 m. de profundidad). Los cuellos de los dos frascos estaban unidos con un tubo dos veces doblado en ángulo recto, inmergido en mercurio. Éste subía poco á poco en el tubo, indicando así la marcha de la absorción del oxígeno y su transformación en gas carbónico, que era fijado por el calcáreo. Pues bien, la ascensión era mucho más rápida en el tubo del primer frasco que en el del segundo; se detiene al cabo de tres días en aquél; se prolonga durante más de tres meses en éste. En invierno, las diferencias (entre

4º y 8º) son aún más pronunciadas. La materia orgánica del subsuelo se consume, pues, mucho más lentamente que la del suelo. En las condiciones naturales, no podrá atribuirse esta diferencia á una aereación insuficiente, porque sabemos que el oxígeno se halla aún en notables proporciones en la atmósfera del subsuelo. Es precisamente á causa de la lentitud de la combustión que esta atmósfera no se empobrece mucho en oxígeno, aun cuando los cambios gaseosos en el exterior sean bastante difíciles.

Schlœsing atribuye á dos causas principales esta lentitud relativa que presenta la combustión de la materia orgánica del subsuelo. La mayor parte de la materia orgánica que llega al subsuelo ha experimentado ya una combustión parcial; no es, pues, más *que un resto de oxidación* que penetra en las capas más profundas. Además, el subsuelo no es alcanzado nunca por los instrumentos de cultivo, nunca es removido; no sufre, pues, la acción directa del oxígeno del aire.

Resumen del estudio de la constitución química de la materia orgánica del suelo.—La materia orgánica del suelo, constituída por los restos de las vegetaciones anteriores, se halla en un estado perpetuo de transformación. Si el oxígeno penetra fácilmente en el interior de la tierra de labor, el carbono se oxida paulatinamente y se desprende en estado de gas carbónico. Cuanto más elevada sea la temperatura, más fácil es la circulación del aire y más rápidamente desaparecerá el carbono del humus, suponiendo que el suelo contenga una suficiente proporción de calcáreo. En las condiciones habituales, la acumulación del gas carbónico en el interior del suelo no es un obstáculo para la respiración de las raíces, porque en virtud de los cambios gaseosos con la atmósfera exterior la renovación del oxígeno se efectúa de una manera satisfactoria en general.

Cuando el suelo es *ácido*, es decir, desprovisto de calcáreo, la oxidación es notablemente retardada. Si la compacidad del suelo pone un obstáculo á la oxidación, la falta de calcáreo y la ausencia de organismos aerobios activos con-

curren igualmente á disminuir mucho la destrucción de la materia carbonada: testimonio de ello es la acumulación de esta materia en las turberas.

El carbono del humus siempre va acompañado de nitrógeno. Éste forma parte integrante de la molécula carbonada: procede de los albuminoides vegetales, y parece que corresponde á muchos núcleos. En este estado, el nitrógeno es inerte respecto de la nutrición de la mayoría de los vegetales; no adquiere forma soluble y difusible más que cuando ha sufrido una serie de transformaciones imputables, en las condiciones naturales, á fenómenos químicos, y sobre todo microbiológicos, para los cuales parece ser indispensable la presencia del calcáreo. Los experimentos de laboratorio demuestran que el núcleo nitrogenado complejo del humus contiene cierto número de amidas: por fijación de agua en estos amidas es que se efectúa la producción de amoníaco, último término de la simplificación del nitrógeno orgánico.

CAPÍTULO IX

PODER ABSORBENTE DE LOS SUELOS RESPECTO DE LAS MATERIAS FERTILIZANTES

Definición del poder absorbente; naturaleza de los fenómenos que entran en juego.—Primeros trabajos relativos al poder absorbente.—Dobles descomposiciones de orden químico.—Fijación del amoníaco, del ácido fosfórico, de la potasa.—Fenómenos de absorción atribuíbles á la presencia de coloides minerales y orgánicos; fenómenos de equilibrio, ley de acción de masa.—Afinidad capilar; acciones de superficie; fenómenos de adsorción.

Definición del poder absorbente; naturaleza de los fenómenos que entran en juego.—Cuando se estudia la composición de las disoluciones del suelo, como hemos dicho anteriormente (pág. 226), y la de las aguas de infiltración que expondremos más adelante, se observa en seguida el siguiente hecho: Ciertas substancias fijas se encuentran en estas aguas en cantidad relativamente notable: por ejemplo, *la cal,* en forma de bicarbonato, de nitrato, de sulfato, de cloruro. Otras, por el contrario, abundan poco: *potasa;* otras, por fin, no existen más que en indicios: *ácido fosfórico, amoníaco.* Si, además, se analizan las aguas de infiltración de los suelos que han recibido abonos químicos variados, solubles en el agua (sales amónicas ó potásicas, superfosfatos, etc.), se observan hechos análogos. Las aguas que han atravesado las tierras así enriquecidas están á veces mejor provistas de materias fijas que en el primer caso, pero estas materias pueden ponerse en el mismo orden respecto de la cantidad que de ellas

se encuentra. Resulta de esto que el suelo, ó á lo menos algunos suelos, *son capaces de retener enérgicamente la mayoría de las materias útiles á la planta*. Á esta propiedad particular se da ordinariamente el nombre de *poder absorbente*. Algunos autores—con razón—han propuesto substituir este nombre por el de *poder selectivo*, porque realmente se trata aquí de una selección de substancias.

Schlœsing da, *a priori*, la explicación siguiente de esta selección: la potasa, el amoníaco, el ácido fosfórico son elementos primordiales respecto de la nutrición de la planta; por esto el suelo, por efecto del cultivo, es desposeído más ó menos completamente de estas substancias. Se comprende entonces por qué es siempre apto para fijarlas cuando se le presentan en forma de abonos. La sosa no penetra más que en débiles proporciones en el vegetal; en cuanto á la cal, generalmente abunda en las tierras de labor. Así un suelo, abundantemente provisto de estas dos últimas bases, no tiene tendencia alguna á absorber nuevas cantidades.

Pero existen otras razones, de orden físico y *sobre todo químico*, que regulan este poder selectivo, como vamos á manifestar.

El interés que despierta el estudio de los fenómenos que forman el objeto de este capítulo es fácil de comprender: Determinar la naturaleza de los factores que entran en juego para retener las substancias alimenticias; modificar, si se puede, estos factores, á fin de aumentar la intensidad del poder absorbente y hacerlos aparecer en un suelo que no los tenga: tales son los problemas cuya solución vamos á buscar; de esta solución dependerá en gran parte la fecundidad de una tierra.

Diferentes modalidades del poder absorbente.—La expresión de *poder absorbente*, que data de las primeras observaciones hechas sobre la facultad que posee el suelo de retener unas substancias con exclusión de otras, parece indicar que, en el ejercicio de este fenómeno, sólo intervienen las propiedades físicas del suelo. Y, en efecto, la influencia de las superficies, la adhesión capilar, desempeñan aquí un papel que no es despreciable.

Sabido es que el carbón vegetal absorbe ciertos gases disuelto en el agua y fija, por ejemplo, los gases olientes (H^2S, NH^3), de tal manera que un agua que los contenga se vuelve inodora después de un contacto ó una agitación más ó menos prolongados. El negro animal y la arcilla descoloran mucho los líquidos orgánicos cuyo colorante es una substancia coloide. El carbón dividido absorbe, en una disolución donde se introduzca, ciertas sales metálicas, como el acetato de plomo: en general, muchos cuerpos coloides, sobre todo cuando son porosos, retienen en una disolución algo de la substancia disuelta. Estos fenómenos, de orden físico, pueden ser evidentemente incluídos entre los múltiples factores que intervienen para retener en el suelo los principios fertilizantes. Sin embargo, demostraremos que ciertas acciones puramente químicas deben ser tomadas en consideración cuando se trata de explicar el mecanismo por el cual ciertas substancias solubles se fijan en los elementos térreos.

En realidad, el estudio del poder absorbente de los suelos es una cuestión extremadamente compleja, dado el gran número de factores que entran en juego y la naturaleza, á menudo indeterminada, de las reacciones físicas ó químicas cuyos efectos se observan.

Si queremos formarnos una idea sumaria de la variedad de los fenómenos que vamos á examinar en el curso de este capítulo, bastará que hagamos algunos sencillos experimentos.

Comprobación del poder absorbente.—Tomemos, por ejemplo, un tubo de 15 á 20 milímetros de diámetro interior y de 30 centímetros de longitud, llenémosle de una buena tierra de labor pasada por el tamiz de 1 milímetro y vertamos con precaución sobre esta tierra una solución muy diluída (1 á 2 gramos por litro) de fosfato potásico, de manera que no se escurra líquido por la parte inferior del tubo. Después de haber dejado el tubo una ó dos horas en reposo, vertamos en el mismo agua destilada de modo que sea *desalojada* la solución fosfatada que habíamos introducido. Un examen, aunque sólo sea cualitativo, del líquido escurrido demostrará que aquellos dos componentes de la sal han sido casi totalmente retenidos por la tierra; efectivamente, el líquido recogido es mucho más pobre en fosfato que el líquido inicial.

Repitamos el mismo experimento con una solución de sul-

fato amónico muy diluída (0,05 gramos por litro), y, después de un contacto suficiente, desalojemos esta solución mediante agua destilada. Apenas hallaremos amoníaco en el líquido escurrido, pero observaremos en él la presencia de una nueva materia, el *sulfato cálcico*. Aquí la absorción no se efectúa respecto de los dos elementos de la sal, como en el primer caso: *sólo es retenida la base;* el ácido, á lo menos en gran parte, no lo es. Ha habido, pues, una doble descomposición entre la sal amónica añadida y el calcáreo contenido en la muestra de tierra empleada, y se ha escapado uno de los productos de la reacción, el sulfato cálcico. Sea lo que quiera, estos dos ensayos tienen de común *el haber entrado en juego una verdadera acción química*. Parece verosímil que, en el primer experimento, la presencia del calcáreo es necesaria para originar por doble descomposición fosfato tricálcico insoluble; pero, se puede preguntar entonces por qué el carbonato potásico, que es muy soluble, no es eliminado así en su totalidad cuando pasa el agua destilada, y por qué el carbonato amónico, también muy soluble, que se ha formado en el segundo experimento, no ha sido eliminado á la vez que el sulfato cálcico, incomparablemente menos soluble.

Estos ensayos tan sencillos nos indican que hay una evidente intervención de algún nuevo factor capaz de detener á su paso las substancias muy solubles á que dan origen los fenómenos de doble descomposición. Si, en un medio tan heterogéneo como la tierra de labor, debe tenerse en cuenta la presencia de los elementos minerales capaces de producir en contacto con las materias salinas introducidas con los abonos una reacción química verdadera, es decir, una reacción química que siga la ley de las proporciones definidas, es también indispensable considerar la posibilidad—y diremos más adelante *la realidad*— de ciertas acciones que ejercen los coloides de la tierra de labor respecto de las sales disueltas que bañan sus partículas. Como hemos dicho ya (pág. 266), no se trata ya aquí de combinaciones en proporciones definidas, sino de combinaciones de *absorción* en las cuales no se cumplen las leyes ordinarias de la química, pero cuya existencia está demostrada, entre otras cosas, por el hecho de la precipitación recíproca de ciertos coloides ó por el de la unión con la masa húmica de bases alcalinas libres ó combinadas con el ácido carbónico (pág. 285). Además, las soluciones salinas del suelo, extremadamente diluídas, están fuertemente *ionizadas* (pág. 248); poseen, pues, una actividad especial que puede manifestarse por la fijación

más fácil del ion positivo (metálico) sobre tal ó cual elemento del suelo con exclusión del ion negativo (radical ácido).

Independientemente de la existencia de reacciones químicas propiamente dichas y de combinaciones de absorción provocadas por la presencia de las plantas cultivadas, es preciso también admitir la existencia de fenómenos de *afinidad capilar,* análogos á los que se observan en la fijación de una materia colorante en las fibras vegetales. En virtud de esta propiedad especial, las substancias orgánicas que se encuentran en el suelo, en grados de concentración muy variados, pueden fijar ciertas sales.

El siguiente experimento, muy clásico, demuestra bien la *adherencia* particular que contraen ciertas bases, por ejemplo, con la celulosa. Se toma una gota de una solución de acetato de plomo de mediana concentración (unos 10 por 100), y se deja caer esta gota en el centro de un disco de papel de filtro. Cuando la gota ha cesado de extenderse, se pone el disco encima de un vidrio mojado con una solución de hidrógeno sulfurado: todo el círculo húmedo toma color negro á causa de la formación de sulfuro de plomo. Si se diluye la solución plúmbica anterior en 10 volúmenes de agua y se repite el mismo experimento con un nuevo disco de papel de filtro, se observará que el círculo húmedo no se ennegrece en toda su superficie. Solamente un círculo concéntrico al primero y de un diámetro tanto menor cuanto más diluída sea la solución, sufrirá la acción del hidrógeno sulfurado. En la primitiva solución al 1 por 100, el ácido y la base estaban combinados de tal manera que la materia del papel de filtro no tenía más afinidad para el uno que para la otra: la solución era homogénea, como lo demuestra la uniformidad de coloración obtenida con el ácido sulfhídrico. En la solución muy diluída, *la sal está hidrolizada;* el papel de filtro ha fijado el hidrato de plomo por absorción en el mismo punto en que ha caído la gota, y sólo el agua se ha difundido mucho más allá del punto en que se ha efectuado esta fijación.

Se puede considerar, pues, 1.º, que la facultad que posee la tierra de labor de retener ciertas substancias es atribuíble á *fenómenos de orden químico,* entre los cuales la doble descomposición salina desempeña el papel principal; 2.º, á *fenómenos de absorción* entre cristaloides y coloides minerales y orgánicos; 3.º, á fenómenos en los cuales intervienen acciones de superficie (atracción capilar). Si estos tres órdenes de fenómenos deben efectuarse á la par para asegurar el funcionamiento del poder absorbente en una tierra que contenga á la vez calcáreo, silicatos coloides, sílice é hidrato férrico coloide, humus coloide—condiciones que se encuentran realizadas en

las buenas tierras de labor—es evidente, en cambio, que la ausencia total ó relativa de una de estas substancias precedentes anulará ó disminuirá la facultad del suelo de retener las materias fertilizantes. De aquí la utilidad, empíricamente reconocida, de introducir en estos suelos menos bien constituídos los elementos activos del poder absorbente, como son: margas arcillosas en los suelos ligeros, abonos verdes en los suelos arcillosos.

División del tema.—Según lo que antecede, es natural examinar el mecanismo del poder absorbente estudiando por separado cada uno de los factores probables que intervienen en el fenómeno. Empleamos intencionadamente la palabra *probables*. No se repetirá demasiado que el fenómeno en cuestión, muy complejo, pasa por una sucesión de fases á menudo difíciles de definir. Adoptaremos el orden siguiente:

I. *Primeros trabajos relativos al poder absorbente*, en los cuales aparecen las múltiples influencias que entran en juego. II. *Dobles descomposiciones de orden puramente químico*. III. *Fenómenos de absorción atribuíbles á la presencia de coloides minerales y orgánicos*. IV. *Afinidad capilar; acciones de superficie; fenómenos de adsorción*. V. *Resumen y conclusiones prácticas*.

I

PRIMEROS TRABAJOS RELATIVOS AL PODER ABSORBENTE DE LOS SUELOS

Estos trabajos están bien resumidos en una memoria publicada en 1859 por Brüstlein, discípulo de Boussingault, de quien tomaremos la mayor parte de los pormenores que siguen.

Experimentos de Way; papel de los silicatos del suelo; trabajos de Liebig.—Un agrónomo italiano, Gazzeri (1819), parece ser el primero que observó la acción que ejerce la tierra arcillosa sobre la parte líquida del estiércol. La combinación *insoluble*

que se forma cuando se agitan juntas estas dos materias, es descompuesta por las plantas que encuentran en ella una fuente de substancias alimenticias. Mucho tiempo después, Huxtable y Thompson (1848) observaron que la parte líquida del estiércol (*purin*) filtrada á través de tierra suministra un líquido incoloro é inodoro, y que la tierra posee la singular facultad de retener en estado insoluble el álcali de una disolución amoniacal, aun cuando el amoníaco no esté libre, sino combinado con los ácidos sulfúrico, nítrico ó clorhídrico.

Way (1850) investiga la causa y las condiciones de esta absorción. Encuentra que no se limita al amoníaco, sino que todas las bases alcalinas ó térreas, potasa, sosa, cal, magnesia, indispensables para el desarrollo de la planta, se comportan de la misma manera: tanto si estas bases están libres, como si están combinadas con un ácido.

¿Tiene esta absorción siempre el mismo valor respecto de una misma base? Por lo que toca al amoníaco, Way demuestra que una misma tierra absorbe cantidades de álcali idénticas; pero, que la absorción depende esencialmente *de la naturaleza* de las tierras, y varía, por kilogramo de substancia, entre 1,57 gramos y 3,921 gr. Observa, además, que estas cifras no tienen nada de absoluto: varían con el grado de concentración del líquido empleado y las proporciones en que se tome este líquido, respecto de la tierra. La absorción es rápida, tan completa al cabo de media hora como al cabo de quince horas de contacto. Las sales amoniacales son descompuestas; solamente es fijada la base, mientras que el ácido se elimina en estado de sal calcárea en el líquido decantado. La causa del fenómeno pareció obscura á Way. ¿Qué papel desempeñan la cal, la alúmina, las materias orgánicas, en este fenómeno? Parecía al citado autor que estas materias no eran indispensables, porque la absorción no aumentaba cuando se añadía calcáreo á una arcilla que estaba desprovista de él. Además, la calcinación de la arcilla no suprime del todo la facultad absorbente, como tampoco la suprime el tratamiento preliminar de la tierra con ácido clorhídrico. Dada la rapidez de la absorción, Way creyó que debía formarse una combinación química: en este caso, si se substituye el amoníaco por la potasa, la absorción será en la relación de los pesos equivalente de estas dos bases. Si bien el peso de la potasa absorbida es mayor que el del amoníaco, no se alcanza, sin embargo, la cifra teórica. Las sales cálcicas en disolución, filtran como tales á través de la tierra; pero, el agua de cal, según la proporción empleada, cede una cantidad de base que varía, por kilogramo de tierra, de 2,31 gr. á 14,68 gr. La absorción de esta base es muy escasa cuando se emplea en forma de bicarbonato. Las sales sódicas y magnésicas se comportan como las sales alcalinas, sin dar lugar á una absorción tan pronunciada. En cuanto al ácido fosfórico, que forma con la cal una sal insoluble, es retenido por el suelo.

Way deduce de estos ensayos que las materias minerales y las sales amoniacales pueden ser aplicadas al suelo en una forma cualquiera, porque la tierra vegetal las reduce á un estado especial en

el cual estas substancias son presentadas á las plantas. La aplicación de los abonos deberá ser lo más uniforme que sea posible, porque á causa de su misma insolubilidad, las substancias fertilizantes no se difundirían. Dada esta insolubilidad, se podrían aplicar al suelo grandes proporciones de abonos; en efecto, una buena tierra puede retener 60 veces la cantidad de principios fertilizantes que ordinariamente se introducen en ella con los abonos.

Hemos citado, tomándolas de Brüstlein, las principales conclusiones del trabajo de Way. Volveremos á encontrar á continuación muchas de las nociones que este experimentador dió á conocer, y á menudo comprobaremos su exactitud.

El punto más curioso de los experimentos hechos por Way para explicar el mecanismo del poder absorbente se refiere á la preparación de un silicato doble artificial, análogo al que el autor suponía existir en el suelo y al cual atribuía las propiedades absorbentes. Precipitando una sal de alúmina por el silicato sódico, Way obtenía un silicato doble de aluminio y sodio con muchas moléculas de agua, en el cual la sosa podía ser reemplazada totalmente por la cal, pudiendo ésta á su vez ser substituída por la potasa, y ésta, en fin, por el amoníaco. Esta substitución recíproca de las bases, en los silicatos coloides complejos, constituye, según veremos más adelante, uno de los caracteres más precisos del poder absorbente.

Henneberg y Stohmann, y después Liebig, confirmaron las investigaciones de Way. Liebig, en particular, demostró, de acuerdo con la opinión de este último autor, que las diversas bases no son fijadas por la tierra de labor en las mismas proporciones. La parte líquida del estiércol cede más potasa, que sosa al pasar á través de la tierra; ésta retiene la totalidad del amoníaco. Algunos años después, Vœlcker llegó á conclusiones análogas. Si se ponen en contacto con tierras de naturaleza muy variada soluciones de potasa y de sosa en estado de cloruro, se encuentra siempre que las tierras retienen más potasa que sosa.

Como las aguas de infiltración son muy pobres en principios fertilizantes, porque el suelo fija estos principios y los hace insolubles, Liebig considera que las raíces deben poseer una fuerza especial que les permita elegir y asimilar las materias que les son indispensables, pero que no encuentran en disolución. Las plantas acuáticas *(Lemma minor)*, cuyas raíces flotan en el agua, estarían, según Liebig, sometidas á otras leyes y podrían tomar sus alimentos directamente de una disolución.

En realidad, el mecanismo de la absorción es el mismo en los dos casos; hemos visto antes que circulaban en el suelo verdaderas disoluciones salinas, muy diluídas sin duda, pero que pueden regenerarse continuamente á medida que desaparecen.

Experimentos de Brüstlein sobre la fijación del amoníaco.—Brüstlein se limita al estudio de la absorción del

amoníaco, á causa de la facilidad de la determinación de esta base. Emplea tres tierras, cuyos caracteres químicos son muy diferentes. La primera, tomada en Bechelbronn, es una arcilla tenue, compacta, bastante rica en calcáreo; la segunda (procedente del Mittelhausbergen), poco plástica, muy homogénea, rica en calcáreo; la tercera es una tierra de huerta del Liebfrauenberg, formada por arena cuarzosa, muy rica en restos orgánicos, residuos de antiguos estiércoles dados abundantemente. 50 gramos de estas diversas tierras se introducen en un frasco con 100 gramos de disolución de amoníaco. Se cierra el frasco y se agita. Después de reposado, se toman 50 centímetros cúbicos del líquido aclarado y se determina el amoníaco; se tendrá, por diferencia, la cantidad de base fijada por la tierra. He aquí la media obtenida en muchos experimentos:

	NH^3 en 100 cc. de la disolución	Concentración relativa de NH^3	NH^3 absorbido por 50 gr. de tierra	NH^3 por 100 de NH^3 dado
Tierra de Bechelbronn .	0,355 gr.	1	0,056 gr.	15,7
—	0,117 »	$\frac{1}{3}$	0,032 »	27,3
—	0,029 »	$\frac{1}{12}$	0,014 »	48,2
Tierra del Mittelhausbergen	0,355 »	1	0,024 »	6,7
—	0,117 »	$\frac{1}{3}$	0,017 »	14,5
—	0,029 »	$\frac{1}{12}$	0,008 »	27,6
Tierra del Liebfrauenberg	0,355 »	1	0,035 »	10,0
—	0,117 »	$\frac{1}{3}$	0,026 »	22,2
—	0,059 »	$\frac{1}{6}$	0,019 »	32,1
—	0,029 »	$\frac{1}{12}$	0,011 »	37,9

Como hace observar Brüstlein, estas cifras no tienen nada de absolutas; son principalmente modificadas por el valor de la disolución y varían con el tiempo de contacto; porque, si se

prolonga el experimento, la tierra fija nueva cantidad de amoníaco.

No parece, pues, que se esté aquí en presencia de una combinación química en proporciones definidas. Sin embargo, los mismos ensayos repetidos con una sal amónica conducirían á hacer admitir, tal vez, la existencia de una verdadera combinación, porque la absorción por una misma tierra es más regular en idénticas condiciones. Conforme con los experimentos de Way, sólo es fijada la base y el ácido queda disuelto en estado de sal cálcica. Si la concentración de la sal amónica varía, la cantidad de amoníaco fijada cambia; un contacto prolongado aumenta la absorción, pero en menor medida que cuando se trata del amoníaco libre.

Brüstlein es llevado así á rechazar la idea de una combinación química propiamente dicha. Considera que el humus podría muy bien jugar un papel activo en la absorción del amoníaco. En efecto, el mantillo, tomado de un roble hueco, fijaba esta base y daba una mezcla inodora; la turba se comportaba del mismo modo. La indiferencia química del cuerpo absorbente está demostrada por el hecho de que el mismo negro animal es también capaz de fijar el amoníaco.

Las tres substancias que acabamos de mencionar, si absorben el álcali libre en cantidades mayores que la tierra vegetal, en cambio, á la inversa de ésta, son incapaces de fijar el amoníaco combinado de una solución salina. Así Brüstlein pensó que esta inercia era debida á la ausencia del carbonato cálcico. En efecto, la tierra de Bechelbronn, tratada por el ácido clorhídrico, y luego lavada y desecada, conserva la propiedad de fijar el amoníaco libre, pero no absorbe el amoníaco en forma de combinación salina. Se devuelve á la tierra su propiedad fijadora mezclándola con calcáreo, siendo la mejor manera de lograrlo hervir esta tierra descalcificada con una solución de bicarbonato cálcico; el calcáreo se precipita entonces en los granos de arena en estado de gran división. Así preparada, la nueva muestra fija el amoníaco de una solución de cloruro amónico y el líquido contiene después del contacto cloruro cálcico. El negro animal lavado con los ácidos, y después calcinado y mezclado

con calcáreo, se comporta como la tierra que ha recobrado su carbonato cálcico. De modo que, según Brüstlein, el poder absorbente de la tierra de labor respecto del amoníaco, depende casi exclusivamente de la constitución física de los elementos minerales y también de las substancias orgánicas que esta tierra contiene. La presencia en el suelo de un carbonato (cálcico ó magnésico) es indispensable para la fijación del amoníaco combinado de un compuesto salino. La formación correlativa de una sal cálcica soluble demuestra que ha habido, en este caso, doble descomposición.

Las conclusiones de estos primeros trabajos son muy interesantes; resumen muy bien los puntos principales de la historia del poder absorbente. Vemos, en efecto, que en el mecanismo del fenómeno, entran en juego, según Way, factores minerales, como ciertos *silicatos*, á cuya presencia se debe atribuir una gran parte en los fenómenos de absorción del amoníaco libre y de las bases en general. El carbonato cálcico (ó el magnésico) interviene para descomponer las sales amoniacales, cuyo ácido pasa al estado de sal cálcica; la base es fijada, ya por los silicatos, ya por el humus (Way-Brüstlein).

Con el objeto de exponer aquí los hechos principales y los mejor observados que caracterizan al poder absorbente, debémos, desde ahora, enunciar las tres proposiciones siguientes, cuya realidad demostraremos á continuación.

1.° El calcáreo interviene cuando se trata de insolubilizar al ácido fosfórico; además, en contacto con las sales amónicas ó potásicas, añadidas como abonos, provoca una doble descomposición con formación de los correspondientes carbonatos.

2.° Estos carbonatos alcalinos se comportan como las bases libres: para que sean retenidos por la tierra de labor, es preciso que encuentren absorbentes de carácter ácido como el humus, ó que sean fijados por los silicatos coloides, cuyos oxhidriles OH libres saturan.

3.° Se comprueba en el suelo la existencia de fenómenos de absorción, que son independientes de la presencia del calcáreo. El metal de una sal soluble puede, por contacto con un silicato zeolítico, desalojar á otro metal contenido en este silicato. En otros términos, hay cambio de bases entre la sal soluble y el silicato zeolítico insoluble.

II

DOBLES DESCOMPOSICIONES DE ORDEN QUÍMICO

Fijación del ácido fosfórico. — Supongamos, por de pronto, el caso de un suelo que no haya recibido nunca abonos fosfatados. En este suelo los líquidos que en él circulan son muy pobres en ácido fosfórico; su concentración debe ser, además, igual á la que corresponde á la solubilidad del fosfato tricálcico en el agua que contiene, naturalmente, una proporción variable de gas carbónico. Pero, diversas causas tienden á disminuir todavía esta solubilidad. Si la tierra es calcárea, el agua, cargada de gas carbónico, disuelve mucho menos ácido carbónico que el agua pura (pág. 60). Además, los fenómenos de *adsorción*, es decir, de adherencia de los cuerpos disueltos alrededor de las partículas sólidas, substraen á los líquidos normales del suelo cierta cantidad de ácido fosfórico. (Véase pág. 337.)

Se comprende, pues, por qué la tierra de labor retiene muy bien el ácido fosfórico y se opone á su marcha con las aguas subterráneas.

Supongamos ahora que el suelo reciba superfosfato de cal, es decir, fosfato monocálcico muy soluble en el agua. Si el suelo en cuestión es calcáreo, la insolubilización de este fosfato en estado bicálcico, y luego tricálcico, es rápida.

Se trata, pues, aquí de un fenómeno químico de neutralización de un ácido polibásico, por un exceso de base. De todos modos, después de una adición de superfosfatos, se ven aparecer en las aguas de infiltración mínimas cantidades de ácido fosfórico, cuya presencia era dudosa antes de esta adición. Este hecho es imputable evidentemente á una disminución del poder absorbente, cuyos diversos factores, saturados de ácido fosfórico, en un momento dado dejan escapar el excedente. Pero, cuando la vegetación se apodera del fósforo á medida de las necesidades de la planta, la proporción del ácido fosfórico de las aguas de infiltración disminuye á menudo hasta el punto de ser despreciable.

Si el suelo al que se ha aplicado el superfosfato es ácido (suelos ricos en humus, desprovistos de calcáreo; suelos graníticos), el fosfato monocálcico encuentra óxidos de hierro y de aluminio, y silicatos coloides que lo retienen enérgicamente por insolubilización. Ésta exige, á veces, cierto tiempo, antes de producirse, y sabido es que las semillas, sembradas en estos suelos poco después de la aplicación de un superfosfato, corren el peligro de encontrar una solución fuertemente ácida, que puede dificultar y hasta anular su evolución. Esta insolubilización, por lenta que sea, se produce siempre, á no ser que el suelo reciba suficiente cantidad de agua, capaz de substraer bastante rápidamente una parte á lo menos de la sal soluble á toda neutralización química. El hecho ha sido, por otra parte, comprobado muchas veces.

Así, á causa del contacto del fosfato monocálcico con los elementos férricos y alumínicos, se forman fosfatos férrico y alumínico, insolubles en el agua cargada de gas carbónico, muy difícilmente utilizables por la vegetación en esta nueva forma, si, en un momento dado, no se adiciona al suelo una proporción suficiente de calcáreo capaz de transformarlos, por doble descomposición, en fosfato tricálcico. Así, pues, por el hecho de la existencia de estas diversas reacciones, el ácido fosfórico no tiene más que una débil tendencia á penetrar en la profundidad del suelo. Dyer ha comparado dos tierras calcáreas, una de las cuales había recibido durante cincuenta años superfosfatos, y ha examinado la repartición del fosfato según la profundidad. Teniendo en cuenta la cantidad de esta substancia extraída por las cosechas, se podía calcular cuál era el excedente que se había debido encontrar en aquella de las dos tierras que había recibido los superfosfatos. Pues bien, más de los $^{4}/_{5}$ del ácido fosfórico que debían encontrarse en el suelo al cabo de cincuenta años estaban localizados en una capa de tierra superficial de 23 centímetros; las capas subyacentes no se habían enriquecido.

Fijación de amoníaco.—Hemos dicho antes (pág. 313) que, cuando se ponía en contacto con una tierra calcárea una disolución muy diluída de una sal amónica cualquiera, se producía una eliminación de cal, la cual se une con el ácido antes combinado con el amoníaco. Aquí la explicación es fácil: se sabe, en efecto, que una solución fría y diluída de sulfato amónico, por ejemplo, es descompuesta por el carbonato cálcico con formación de sulfato cálcico y carbonato amónico. Este último, ó más bien el amoníaco solo, es ligado por el

humus ó por los silicatos coloides cuyo papel es de primera importancia respecto de la absorción, como veremos más tarde. Parece difícil admitir cualquier otra hipótesis en el caso actual; la presencia de una sal cálcica soluble, después de doble descomposición, indica bien el sentido de la reacción. Además, el peso del humus contenido generalmente en una buena tierra de labor es más que suficiente para retener la cantidad de amoníaco correspondiente á 300 ó 400 kilogramos de sulfato, proporción del abono empleado ordinariamente en la superficie de una hectárea. Se comprende, pues, que en tanto *la saturación* del humus como la de los silicatos no sea alcanzada, el amoníaco, desprendido de su combinación inicial, no pasará á las aguas de lavado del suelo: esto es lo que se observa en las condiciones naturales; el amoníaco es raro ó falta en estas aguas.

Fijación de la potasa.—Lleguemos ahora á la absorción de las *sales potásicas*. Ésta es real, puesto que las aguas de lavado del suelo son pobres en potasa, aunque están algo más cargadas de esta base que de amoníaco. La experiencia enseña, además, que la aplicación de abonos potásicos (cloruro ó sulfato potásicos) aumenta notablemente la riqueza de las aguas de infiltración en potasa. Pero, aun en este último caso, no se observa apenas *al máximo* más que una pérdida que sube á una decena de kilogramos de esta base por año y por hectárea. Las sales potásicas, pues, son retenidas por el suelo.

Cuando se aplica directamente á la tierra carbonato potásico (cenizas vegetales), se comprende que el humus intervenga en parte para unirse con esta sal alcalina. El humus, á menos que esté saturado de cal, posee efectivamente propiedades ácidas; descompone el carbonato de potasio y el gas carbónico queda en libertad. Los silicatos coloides se apoderan también de cierta cantidad de esta sal, ya sea por absorción, ya sea por combinación química propiamente dicha. Volveremos á este punto. En realidad, el carbonato potásico se comporta como la potasa libre.

Sin embargo, parece que debe buscarse otra explicación de la fijación de la potasa cuando se aplica al suelo sulfato ó cloruro potásico.

En este caso, comparable al de la aplicación del sulfato amónico, ¿interviene una doble descomposición entre el calcáreo y la sal potásica? Veamos primero si se efectúa la doble descomposición en el siguiente sentido:

$$CO^3Ca + 2KCl = K^2CO^3 + CaCl^2;$$

Veremos en seguida si es posible concebir otro modo de fijación de la potasa por el suelo.

Cuando se riega con una solución muy diluída de cloruro potásico una columna de tierra de labor, se observa, si la duración del contacto ha sido suficiente, que el líquido que escurre de la parte inferior de la columna contiene, como en el caso de una sal amónica, una sal cálcica soluble; en el caso presente, esta sal es el cloruro. En cuanto á la potasa, es retenida tanto mejor cuanto más diluída es la solución inicial y cuanto más tiempo permanece en contacto con la tierra. De hecho, si se hace hervir durante algunas horas una solución de cloruro potásico con carbonato cálcico, hay formación de una pequeña cantidad de carbonato potásico que comunica al líquido una reacción alcalina. El mismo fenómeno se observa cuando se opera en frío, al cabo de un tiempo bastante largo.

La reacción: $K^2CO^3 + CaCl^2 = CO^3Ca + 2KCl$, que es considerada como prácticamente total en el sentido de esta reacción, podría producir un fenómeno de equilibrio.

La producción de carbonatos alcalinos en el seno de la tierra de labor parece, por otra parte, favorecida por la presencia del gas carbónico libre, según resulta del siguiente experimento, debido á Mondésir (1888).

Estudiando la formación de los carbonatos de sosa naturales, este autor fué conducido á hacer el siguiente ensayo: Un kilogramo de una tierra muy rica en humus y en calcáreo fué desleída en 4 litros de una disolución al 1 por 100 de cloruro sódico. Esta tierra transformó en cloruro cálcico 15 por 100 de sal marina. «*Después de lavados que eliminaron casi la totalidad de las sales, la tierra, puesta en agua pura, fué tratada por ácido carbónico, y este tratamiento fué repetido 4 veces. Las disoluciones dieron por evaporación, después de posarse el carbonato cálcico, una cantidad de carbonato sódico correspondiente á la transformación del cloruro sódico.*» El autor, substituyendo en una operación la sal marina por el cloruro potásico, y, en otra, el bicarbonato cálcico por el sulfato cálcico, obtuvo, con el mismo kilogramo de tierra, por una parte 12 gramos de bicarbonato potásico, y, por otra, 13 gramos de sulfato sódico pesado en estado anhidro.

Aparece, pues, que la doble descomposición entre una sal potásica soluble y el calcáreo puede efectuarse en el seno de la tierra de labor en las condiciones naturales: siendo los

agentes de la fijación del carbonato alcalino formado, como hemos dicho, el humus y los silicatos coloides cuyos oxhidrilos libres son capaces de fijar las bases.

Cuando el poder absorbente está satisfecho, esto es, cuando la tierra ha alcanzado cierto grado de saturación respecto de la potasa, grado variable con la naturaleza de esta tierra, la doble descomposición entre las sales potásicas solubles y el calcáreo parece que ya no se realiza. Esto es lo que ocurre, según Dumont, cuando se trata previamente una tierra por carbonato potásico: no se produce ya el desdoblamiento de los abonos potásicos, cualquiera que sea la proporción de calcáreo, cuando la absorción está satisfecha.

Sea lo que fuere, si se considera la cuestión *desde el punto de vista práctico,* se encuentra que, si la potasa y el amoníaco son fijados por la tierra de labor, estas bases lo son de una manera diferente según que se las aplique al suelo en forma de carbonato ó en forma de sulfato. Esta diferencia de fijación ha sido observada, hace ya mucho tiempo, á propósito de investigaciones apropiadas para esclarecer la teoría del enyesado.

Sabido es que, de todas las ventajas reconocidas en la acción del yeso, la más real y la única que está fuera de duda consiste en una solubilización de la potasa. Esta base se moviliza y desciende á la profundidad del suelo en que las raíces de las leguminosas, á veces muy largas, pueden absorberla. Probablemente es en *estado de sulfato* que la potasa avanza así en las capas profundas.

Para estudiar la absorción comparada de los carbonatos y de los sulfatos, se hacen reaccionar de 50 á 200 gramos de caolín ó de tierra vegetal con soluciones diluídas de carbonato y de sulfato potásicos. Se mide el volumen de la solución salina; se deja ésta en contacto con la tierra durante algunas horas, luego se filtra y se determina la potasa ó el amoníaco en el líquido filtrado. Se conoce así, por diferencia, lo que ha absorbido la arcilla ó la tierra. La experiencia demuestra que, en el caso de estas dos bases, el carbonato es más fuertemente retenido que el sulfato. La media general de las diferencias obtenidas es la siguiente:

		Cantidad de base retenida
En 100 partes de potasa introducidas en una materia absorbente en estado de:	Carbonato	74
	Sulfato	32
En 100 partes de amoníaco introducidas en una materia absorbente en estado de:	Carbonato	80
	Sulfato	31,5

(Dehérain.)

III

FENÓMENOS DE ABSORCIÓN ATRIBUÍBLES Á LA PRESENCIA DE COLOIDES MINERALES Y ORGÁNICOS

Hemos visto, algunas páginas atrás, que Way había presentido ya el papel importante de los silicatos en la absorción de las materias fertilizantes. El examen detenido de esta cuestión nos enseñará que ciertas clases de silicatos *(las zeolitas)* se prestan con gran facilidad á la substitución recíproca de unas bases por otras.

Desalojamiento de las bases en un silicato zeolítico. —Eichhorn (1858) puso claramente de manifiesto la naturaleza de este desalojamiento. Tomó *chabasia* (silicato doble de aluminio y calcio hidratado) cuya composición centesimal era la siguiente: $SiO^2 = 47,4$; $Al^2O^3 = 20,7$; $CaO = 10,4$; $K^2O = 0,7$; $Na^2O = 0,4$; $H^2O = 20,4$.

Se puede representar esta composición mediante la fórmula siguiente de constitución (no teniendo en cuenta la potasa y la sosa): $Si^4Al^2CaO^{18}H^{12} = 4SiO^2 . Al^2O^3 . CaO . 6H^2O$,

```
           OH    OH  OH    OH
             \  /      \  /          /OH
          O — Si — O — Si — O — Al —<
         /                           \OH
      Ca                             /OH
         \                          /
          O — Si — O — Si — O — Al —<
             /  \      /  \          \OH
           OH    OH  OH    OH
```

fórmula en la cual se han puesto en evidencia algunos oxhidrilos (OH), unidos unos con el aluminio y otros con el silicio. Es fácil mediante esta fórmula (ó cualquier otra análoga) descubrir la razón de por qué este silicato hidratado fija, ya radicales básicos, ya radicales ácidos, según que estos radicales ocupen el lugar de un oxhidrilo unido al aluminio ó al silicio.

Una muestra de este mineral pulverizado fué tratada durante diez días por una solución de sal marina al 1 por 100; otra muestra durante veintiún días por una solución de carbonato sódico al 4 por 100; otra, durante veintiún días, por una solución de cloruro potásico al 1 por 100. La sosa y la potasa desalojaron una parte de la cal y ésta apareció en disolución en estado de cloruro cálcico. La cal de la chabasia es igualmente desalojable por el amoníaco, y la nueva substancia así formada no pierde amoníaco á 110°, mientras que el silicato primitivo ya principia á alterarse á esta temperatura.

Resulta de estos experimentos, *hechos en ausencia de calcáreo,* que las bases pueden substituirse unas á otras en ciertos silicatos hidratados. En principio, éstos son fácilmente atacables por los ácidos fuertes y parecen ser los únicos que poseen esta singular propiedad de cambiar algunos de sus componentes básicos por otras bases puestas en su presencia en forma de soluciones alcalinas.

Los fenómenos de desalojamiento de las bases en el suelo son correlativos de la presencia de silicatos hidratados.—Entre los trabajos más importantes relativos á este cambio de bases, no ya respecto de un mineral determinado, sino en contacto con la tierra misma, citaremos los siguientes:

Absorción de la potasa en disolución. — Peters (1859), trató 250 gramos de tierra por un líquido acuoso, que contenía, en un volumen de 250 centímetros cúbicos, varias sales potásicas en las concentraciones de $^1/_5$, $^1/_{10}$, $^1/_{20}$, $^1/_{40}$, $^1/_{80}$, de equivalente $\left(\frac{K^2O}{2}\right)$. Después de agitación y contacto de veinticuatro horas, decantó y determinó la potasa del líquido decantado. Las diversas sales potásicas se comportaron, desde el punto de vista de su absorción, de diferente manera. La duración del contacto y la temperatura no ejercieron más que una débil influencia en el fenómeno; la cantidad absoluta de la potasa absorbida creció con la concentración del líquido. Sin embargo, la tierra tomó á una solución diluída una proporción de este álcali, proporcionalmente más elevada que la que substrajo á las soluciones más concentradas. Cualquiera que sea la disolución de los líquidos, la tierra, en las condiciones en que se puso Peters, nunca retiene la totalidad de la base disuelta. Cuando se examina la composición del líquido decantado, se encuentran, no sólo cal, sino también magnesia, sosa y sílice. Si la tierra ha sido tratada previamente por el ácido clorhídrico caliente, y luego ha sido bien lavada, pierde en gran parte su capacidad de absorción respecto de la potasa: se ve aquí todavía el papel de los silicatos hidratados,

solubles en los ácidos fuertes, cuya destrucción disminuye el poder que normalmente posee la tierra de fijar ciertas bases.

Por lo que toca á los ácidos contenidos en las sales cuya base es absorbida, no son retenidos por la tierra más que cuando pueden formar, con la cal ó la magnesia, compuestos insolubles (ácido fosfórico). Resulta, pues, de estos experimentos que hay una *substitución* efectiva de ciertas bases por otras.

Observaciones sobre los equilibrios.—Rumpler (1901) ha hecho, á propósito de los trabajos de Eichhorn y de Peters, algunas observaciones interesantes. Puede parecer inexplicable que un silicato, insoluble como la *chabasia*, cambie sus bases cuando se le pone en presencia de ciertas sales. Pero, no existen en realidad substancias absolutamente insolubles en el agua, y las substituciones, tales como las que hemos citado á propósito de la chabasia, son bastante frecuentes. La solubilidad del fosfato tricálcico, por ejemplo, es muy escasa; aumenta con el contacto de las sales amoniacales y alcalinas: hay cambio de bases. El fosfato trimagnésico, muy poco soluble, se transforma, en contacto con sal amoníaca y amoníaco, en fosfato amónicomagnésico. Los experimentos de Peters demuestran que se produce un *equilibrio químico* entre las diversas substancias que están en mutuo contacto. Este equilibrio depende de las proporciones en que se encuentran las bases, por una parte en el suelo y en las soluciones salinas añadidas por otra; como también de la relación entre la cantidad total de las bases contenidas en el suelo y la cantidad total de las bases contenidas en la solución. Esto es una aplicación de la *ley de acción de la masa* (véase pág. 334).

Se puede, según Rumpler, concebir este equilibrio de la siguiente manera. Imaginémonos un silicato en el cual, entre las bases susceptibles de cambio, no haya más que la cal y la potasa y en el que la relación ponderal entre la primera y la segunda de estas bases sea 99 : 1. Si se pone este silicato en contacto con un líquido que no contenga más que cal y potasa, pero en el cual la relación de estas bases sea precisamente la inversa de la anterior, 1 : 99, la potasa se combinará con el silicato, y la cal que contiene éste será desalojada;

entrará en disolución hasta que se haya establecido un estado de equilibrio entre los diferentes factores de esta reacción. Si se añade entonces á la mezcla cierta cantidad de nitrato potásico, el precedente equilibrio es destruído; el silicato pierde una nueva cantidad de cal que pasa á la solución, mientras que una nueva cantidad de potasa se combina con el silicato.

Estas substituciones y estos equilibrios aparecen claramente en los experimentos de Peters. Rumpler ha calculado que, en la muestra de tierra empleada por este último autor, la relación de la potasa con la suma de las otras bases era igual á 1 : 6,46. Agitando con esta tierra soluciones de cloruro potásico de las concentraciones antes indicadas, la relación de la potasa con las otras bases toma sucesivamente los valores siguientes:

	Relación: Potasa / suma de las otras bases
Para una solución de KCl á 1/80 de equivalente	1 : 1,83
— 1/40 —	1 : 0,70
— 1/20 —	1 : 0,41
— 1/10 —	1 : 0,20
— 1/5 —	1 : 0,17

Para la misma tierra, la relación de substitución cambia, pues, con la concentración de la solución puesta en su contacto.

Desalojamiento de las bases por el gas carbónico. Cambio de bases. — Las substituciones de bases en los silicatos son igualmente muy visibles en los siguientes experimentos, debidos á Lemberg (1876), que tomamos de la obra de Ramann (*Bodenkunde*, 1911, p. 54). Lemberg trata, durante tres semanas, por agua cargada de gas carbónico, un silicato hidratado cuya composición, descontando el agua, es la siguiente:

(1)

Sílice = 46,6 p. 100
Alúmina = 29,3 —
Potasa = 22,7 —
Sosa = 1,4 —

Después de la acción del gas carbónico, la composición del silicato queda modificada del siguiente modo:

(2)

Sílice = 54,0 p. 100
Alúmina = 39,6 —
Potasa = 5,3 —

La mayor parte de la potasa se ha disuelto, pues, bajo la influencia del gas carbónico empleado en exceso. Si se pone este silicato así modificado en contacto con una lejía de potasa, su composición se convierte en:

(3) Sílice = 46,6 p. 100
Alúmina = 35,6 —
Potasa = 17,7 —

El silicato, por lo tanto, ha vuelto á tomar casi todo el álcali que le había hecho perder el tratamiento por el ácido carbónico; pero, tratado por el agua, pierde nuevamente una parte de su potasa. Es evidente, según esto, que las variaciones de la composición del silicato primitivo dependen de la masa del agua empleada, por una parte, y de la de la potasa, por otra.

El silicato primitivo (1), tratado por el cloruro amónico, cambia casi la totalidad de su potasa por amoníaco; presenta entonces la composición siguiente:

(4) Sílice = 56,1 p. 100
Alúmina = 34,6 —
Potasa = 0,9 —
Amoníaco = 8,3 —

Resulta de esto que 8,3 de amoníaco han reemplazado á 22,7 — 0,9 = 21,8 de potasa; NH^3 = 17 ha reemplazado, pues, á $\frac{K^2O}{2}$ = 47,1: en efecto, 8,3 de amoníaco NH^3 corresponden á 23,14 $\frac{K^2O}{2}$, cifra próxima á 21,8. Existe, pues, equilibrio entre el agua, los componentes del suelo y las diversas substancias salinas disueltas que se hallan en contacto con éste: estos desalojamientos no se efectúan más que cuando se pone en presencia del silicato un gran exceso de solución.

Conclusiones análogas á las que pueden deducirse de los experimentos de Peters, han sido formuladas por Pillitz (1875). Según este autor, cada tierra tiene, respecto de la absorción de la potasa, del amoníaco, del ácido fosfórico, *un punto de saturación definido*, por encima del cual no hay ya absorción. Una concentración mínima de la solución empleada es necesaria para saturar una tierra dada: la absorción de las bases, como la potasa y el amoníaco, se efectúa en proporciones equivalentes. Por lo que toca al amoníaco, esta base es absorbida independientemente de la presencia del calcáreo. Pero, contra la opinión de Peters, Pillitz demuestra que la concentración de la solución no cambia la intensidad de la absorción. Cuando se hace actuar una solución de fosfato potásico sobre la tierra, ésta absorbe los elementos de la sal, ácido y base, en las mismas proporciones en que existen en la sal.

El reproche que se ha dirigido á estos últimos experimentos es de haber sido hechos con soluciones demasiado concentradas, no comparables con las que corresponden á las concentraciones fisiológicas (Knop).

Sin embargo, Kellner ha confirmado la mayoría de los hechos enunciados por Pillitz, entre otros el que se refiere á la absorción *equivalente* de la potasa y del amoníaco. Demuestra que, si la riqueza de un suelo en materias húmicas y en silicatos zeolíticos aumenta el poder absorbente, existe también otro factor que entra en juego: es la extensión de la superficie ofrecida por estas materias á las substancias destinadas á ser absorbidas.

Conforme con los datos de Peters, Kellner, empleando soluciones de sal amoníaco, ha podido desalojar á la potasa por absorción en una tierra. Este desalojamiento suministra una cantidad de potasa algo superior á la que la tierra había tomado á las soluciones: en efecto, la sal amoníaco desaloja, además, una pequeña proporción de la potasa contenida primitivamente en la tierra.

Entre los hechos interesantes observados por Kellner es preciso citar el siguiente. La potasa, la cal y la magnesia no contribuyen á la nutrición de la planta más que en tanto estas bases existen en el suelo en forma disuelta, ó en forma de combinaciones de absorción fácilmente desalojables. Esta proporción ha sido comprobada directamente por la experiencia.

Experimentos de Van Bemmelen, papel de los hidrogeles. — Completemos los datos precedentes con algunas observaciones debidas á Van Bemmelen. Entre las bases que contienen los silicatos zeolíticos, la cal y la sosa se desalojan, en contacto con una sal disuelta, con más facilidad que la magnesia y, sobre todo, que la potasa. Se comprende, pues, por qué la potasa y la sosa se encuentran en proporciones notables en las aguas de infiltración, independientemente de la solubilidad propia del bicarbonato cálcico en los líquidos del suelo. Si se adiciona á una tierra nitrato potásico, pasa á las aguas de infiltración nitrato sódico, acompañado de nitrato cálcico. El escaso desalojamiento de la potasa en las zeolitas explica la escasez relativa de esta base en las aguas subterráneas.

Los *hidrogeles*, sobre todo el del ácido silícico, son capaces *de absorber* los álcalis y las tierras, sin que haya combinación en el sentido propio que se da á esta palabra en química. Los hidrogeles pueden igualmente retener ciertos ácidos. Graham ha demostrado hace mucho tiempo que un hidrogel, puesto en presencia de un líquido que no sea el agua (alcohol, glicerina, etc.), podía cambiar el agua que

contiene por el nuevo líquido; se forma entonces un *alcoholgel*, un *glicerogel*. Aquí tampoco hay acción química.

Un hidrogel absorbe tanto mejor, en general, una substancia dada, en cuanto el cuerpo sólido en suspensión en el hidrogel y la substancia en contacto con la cual se encuentra pueden, en otras circunstancias, entrar en combinación química.

He aquí algunos tipos de estas *combinaciones de absorción* estudiadas por Van Bemmelen. El hidrogel silícico, puesto en contacto con una solución de carbonato potásico, toma una parte de la potasa de esta sal; el resto de esta base queda en estado de bicarbonato. En contacto con el fosfato bisódico PO^4Na^2H, el hidrogel silícico se apodera de un átomo de sodio y deja fosfato monosódico PO^4NaH^2. Cuando el hidrogel silícico se encuentra en presencia de una mezcla de carbonato cálcico y de cloruro potásico, es probable que ocurra la siguiente reacción: Una parte de la cal es tomada por el hidrogel con formación de bicarbonato cálcico soluble; esta última sal entra en seguida en doble descomposición con el cloruro potásico, y el carbonato potásico resultante cambia su potasio por el calcio del hidrogel: de donde deriva la formación de un hidrogel de silicato potásico. La potasa es, pues, absorbida y quedan en solución cloruro y bicarbonato cálcico. Cuando un hidrogel se transforma poco á poco por la influencia del tiempo y pierde sus cualidades coloidales, no es apto ya para formar combinaciones de absorción.

Así, un coloide mineral que afecte la forma de *gel* es susceptible de absorber, ya bases, ya ácidos, sea directamente, sea en virtud de una serie de dobles descomposiciones que ponen en libertad á estas bases ó á estos ácidos. El hidrogel silícico es igualmente capaz de fijar ciertas sales alcalinas (cloruros, sulfatos, nitratos); estas sales se reparten entre el agua del gel y el agua de disolución. De todos modos, no debe exagerarse la importancia del papel que puede desempeñar la sílice en el estado de *gel;* la sílice, en efecto, parece ser poco abundante en el suelo en esta forma.

Poder absorbente de los coloides húmicos.—Al lado de los coloides minerales, se encuentran siempre en el suelo coloides húmicos. Hemos estudiado anteriormente algunas de

las reacciones á que se prestan estas substancias especialmente respecto de las bases libres. Repetiremos aquí que las seudocombinaciones que se forman en las condiciones que hemos especificado no entran en la ley de las proporciones definidas, y que las materias húmicas son agregados muy complejos que escapan á toda fórmula fija. Según Van Bemmelen, muchas materias húmicas poseen las propiedades de los hidrogeles. Cuando se tratan por el agua ó el alcohol los pies de ciertos helechos, se obtiene un líquido pardorrojizo. Este es en gran parte coagulado por pequeñas cantidades de los ácidos sulfúrico, clorhídrico, oxálico, como también por ciertas soluciones salinas (sulfato potásico, cloruro amónico). Si se hace actuar la potasa sobre la turba ó el mantillo, se obtiene un líquido pardo muy obscuro que, sometido á una prolongada diálisis, da un líquido neutro. El humato alcalino así preparado se coagula fácilmente en presencia de ácidos enérgicos y de ciertas sales. Los copos, separados por filtración y desecados, contienen siempre cierta proporción de nitrógeno y de substancias fijas. Entre éstas se encuentran las materias que el humus contenía en su origen; además, una pequeña cantidad de la sal que ha servido para producir la coagulación es enérgicamente retenida.

Los complejos húmicos juegan cierto papel en el poder absorbente, pero su actividad se limita á las solas bases libres ó á los carbonatos alcalinos disueltos en los líquidos del suelo. Sin embargo, según muchos autores, el humus ácido (turba) es capaz de descomponer muchas sales de ácido débil y de apoderarse de sus bases. La cantidad de base absorbida es tanto mayor cuanto más débiles son los ácidos minerales con que están combinadas estas bases (ácido carbónico, ácido fosfórico). En cuanto á los ácidos sulfúrico y clorhídrico, son muy difícilmente desalojados. Con todo, se ha emitido la opinión de que la acidez del suelo, perjudicial á los vegetales, no debía ser atribuída al ácido húmico libre, sino más bien á la de los ácidos minerales que el ácido húmico pone en libertad. Sea lo que fuere, los fenómenos de absorción á que da lugar la presencia del humus son de una importancia secundaria cuando se comparan con los que producen los silicatos zeolíticos.

En las combinaciones que hemos descrito con el nombre de *combinaciones de absorción*, es difícil establecer una

exacta división entre el fenómeno de la *absorción* propiamente dicha, esto es, de la combinación de dos substancias en proporciones no definidas, pero que en realidad están unidas en virtud de una afinidad química especial, y el fenómeno de la *adsorción*, que es de *orden físico*, y en el cual no entran en juego más que las acciones de superficie (Véase pág. 337).

Fenómenos de equilibrio; ley de acción de la masa. —Á menudo hemos aludido, en las páginas anteriores, á los fenómenos de equilibrio químico: demos ahora, respecto de ellos, algunas explicaciones muy sencillas y muy clásicas destinadas á demostrar su importancia, y citemos uno de los ejemplos más claros:

Pongamos una molécula de alcohol ordinario en presencia de una molécula de ácido acético; dejemos la mezcla en reposo y determinemos, de vez en cuando, la *concentración* en ácido de esta mezcla. Observaremos que esta concentración va disminuyendo cada día, para llegar finalmente á un valor fijo, *siendo constante la temperatura*. El ácido y el alcohol han reaccionado para engendrar un cuerpo neutro, el éter acético, con eliminación de una molécula de agua:

$$(1) \quad CH^3CO^2H + C^2H^5OH = CH^3CO^2C^2H^5 + H^2O.$$

Pero, *la reacción no es completa;* se detiene en un cierto momento, cuando existen todavía ácido y alcohol libres en presencia uno de otro.

Inversamente, tomemos una molécula de agua y una molécula de éter acético: el agua descompondrá progresivamente al éter (saponificación).

$$CH^3CO^2C^2H^5 + H^2O = CH^3CO^2H + C^2H^5OH.$$

Aquí también la reacción se detendrá, y la composición de la mezcla, en el límite, será exactamente la que figura en la ecuación (1).

Esta última reacción es, pues, posible *en los dos sentidos;* se la llama *reversible,* y la mezcla, cuando ha terminado la reacción, constituye un *sistema químico en equilibrio* que se formula así:

$$CH^3CO^2H + C^2H^5OH \rightleftarrows CH^3COC^2H^5 + H^2O.$$

Á un sistema semejante añadamos una pequeña cantidad de ácido acético: el equilibrio se rompe. Una nueva porción de ácido actúa sobre el alcohol que habrá quedado libre hasta que se establezca un nuevo estado de equilibrio. Lo mismo ocurriría si, en vez de añadir ácido, hubiésemos añadido alcohol, éter ó agua. Todos los cuerpos que intervienen en la ecuación anterior son *factores del equilibrio.*

Del mismo modo, un sistema en equilibrio, *en el cual se modifica la temperatura ó la presión,* experimenta una modificación química que lo lleva á otro estado de equilibrio: la presión y la temperatura son, pues, también *factores del equilibrio.*

Todo sistema químico en equilibrio satisface á una ley muy importante: *la ley de acción de la masa ó de la concentración.*

Volvamos al ejemplo precedente en el cual tenemos el sistema: ácido, alcohol, éter, agua; definamos el estado del sistema en equilibrio á cierta temperatura, *por la concentración de cada uno de los cuerpos en presencia,* es decir, *por el número de moléculas contenidas en la unidad de volumen.*

Sean c, c_1, c_2, c_3, las concentraciones moleculares del ácido, del alcohol, del éter, del agua. La ley de acción de la masa nos enseña que *la relación del producto de las concentraciones de los cuerpos contenidos en el primer miembro de la ecuación química* (1), *que define la reacción que ha conducido al equilibrio, al producto de las concentraciones de los cuerpos contenidos en el segundo miembro de esta misma ecuación es constante para una misma temperatura:*

$$\frac{c \times c_1}{c_2 \times c_3} = \mathrm{K}$$

K es, pues, función de la temperatura solamente.

Así, si hacemos la temperatura constante, y si añadimos, por ejemplo, alcohol á la mezcla en equilibrio, el sistema será modificado: alcanzará, al cabo de algún tiempo, un estado de equilibrio diferente del primero, y las nuevas concentraciones c', c'_1, c'_2, c'_3, que definen este nuevo estado de equilibrio, satisfarán siempre á la relación:

$$\frac{c' \times c'_1}{c'_2 \times c'_3} = \mathrm{K} = \frac{c \times c_1}{c_2 \times c_3}$$

Cuando, en la reacción química que conduce á un cierto estado de equilibrio, la fórmula molecular del cuerpo es afectada de un *coeficiente,* la concentración correspondiente en la expresión de la ley de acción de la masa debe ser afectada de un exponente igual á este coeficiente.

Por ejemplo, el yodo y el hidrógeno, calentados en un tubo cerrado, reaccionan formando ácido yodhídrico, hasta el establecimiento de cierto estado de equilibrio:

$$\mathrm{H} + \mathrm{I} \rightleftarrows \mathrm{HI}$$

Si queremos aplicar aquí la ley de acción de la masa, debemos por de pronto, en la ecuación correspondiente, representar todos los cuerpos *por su fórmula molecular:*

$$(2)\quad \mathrm{H}^2 + \mathrm{I}^2 \rightleftarrows 2\mathrm{HI}$$

$$c \qquad c_1 \qquad c_2$$

y tendremos, en virtud de la acción de la masa, la relación:

$$\frac{c \times c_1}{c_2^2} = K$$

La concentración c_2 del ácido yodhídrico debe llevar el exponente 2, igual al coeficiente de HI en la ecuación (2).

Cuando uno de los cuerpos del sistema en equilibrio es *sólido*, su concentración no interviene en la expresión de la ley de acción de la masa. Sea, por ejemplo, la acción del agua sobre el hierro:

$$4H^2O + Fe \rightleftarrows Fe^3O^4 + 4H^2$$

Esta reacción es *reversible;* da lugar á un estado de equilibrio. Consideremos, pues, el sistema gaseoso en equilibrio á cierta temperatura y apliquemos aquí la ley de la masa: sean c_1, c_2, c_3, las concentraciones del vapor de agua, del vapor de hierro, del vapor de Fe^3O^4, del hidrógeno; tendremos:

$$\frac{c_1^4 \times c_2^3}{c_3 \times c_4^4} = K$$

Pero, como no hay que tener en cuenta las tensiones de vapor del hierro y del óxido Fe^3O^4; la ecuación se reduce simplemente á:

$$\frac{c_1^4}{c_4^4} = K \text{ ó } \frac{c_1}{c_4} = K$$

Consideremos ahora un sistema de sales disueltas en el agua y en equilibrio:

$$AB + A_1B_1 = AB_1 + A_1B$$

en el cual c_1, c_2, c_3, c_4 son las respectivas concentraciones. En el equilibrio, tendremos:

$$\frac{c_1 \times c_2}{c_3 \times c_4} = K$$

Pero muchas sales están *ionizadas* en solución acuosa; en este caso, será preciso, para aplicar la ley de acción de la masa, introducir la concentración no teniendo en cuenta *más que la parte de la sal ó de las sales no ionizadas,* es decir, de la fracción de la sal ó de las sales que existen realmente en la solución.

Notemos que la ley de acción de la masa no se aplica generalmente más que á sistemas en los cuales las substancias que reaccio-

nan se hallan en estado diluído, como los gases y los cuerpos en solución diluída. Los sistemas que engendran los éteres á partir de un ácido y de un alcohol (ecuación 1) satisfacen, sin embargo, todavía á la ley, si bien que estos sistemas contienen cuerpos que reaccionan en fuertes concentraciones.

La ley de acción de la masa interviene continuamente para regular el sentido de los fenómenos de doble descomposición que se efectúan en el suelo, como hemos hecho constar muchas veces en este capítulo.

En efecto, volvamos á la ecuación:

$$CO^3Ca + 2KCl = K^2CO^3 + CaCl$$

y llevémosla al medio donde debemos estudiarla aquí, esto es, á la tierra de labor. Por escasa que sea la cantidad de carbonato que se forma, una vez formada es absorbida por los coloides húmico y arcilloso; sale, por consiguiente, del campo de la reacción. Se forma una nueva cantidad de esta sal, y así sucesivamente hasta la *transformación total* del cloruro en carbonato potásico. Un abono potásico, como el cloruro, podrá, pues, en un suelo aunque sea poco calcáreo, pasar casi integralmente al estado de carbonato.

IV

AFINIDAD CAPILAR, ACCIONES DE SUPERFICIE. FENÓMENOS DE ADSORCIÓN

El poder absorbente de los suelos ha sido atribuído algunas veces á fenómenos puramente físicos, análogos á los de la tintorería. Sabido es, en efecto, que las materias colorantes se adhieren de un modo notable á ciertos tejidos (algodón, cáñamo, lino, lana) sin que sea posible hacer intervenir en esta adhesión la noción de combinación química. Con las expresiones *de atracción de superficie* ó *de afinidad capilar* han sido designados á menudo los conocidos hechos que acabamos de recordar. Un fenómeno análogo se efectúa ciertamente en el suelo en el contacto de los elementos de la tierra

de labor con las soluciones que les rodean. Cuando una de estas soluciones se encuentra en presencia de partículas térreas, hay por de pronto *adsorción* de la sal, es decir, adherencia de ésta al grano sólido; y, por consiguiente, la riqueza de la solución primitiva disminuye. Á veces el fenómeno se detiene aquí; no se completa por una acción química y, si se lavan con agua pura los granos impregnados de la sal, ésta es totalmente eliminada: esto es lo que ocurre cuando una solución de nitrato sódico ó de sal marina se encuentra en presencia de granos únicamente arenosos: estas substancias no son retenidas en la superficie de los granos más que por una *atracción de superficie* y la sal puede encontrarse allí, pero no hay reacción química. Y aun esta adsorción es muy débil. Por el contrario, si hay cambio de bases entre la solución salina y los elementos del suelo, como ocurre en presencia de silicatos coloides, sigue una reacción química á los fenómenos de adsorción, y entramos en el caso de los desalojamientos antes examinados. Las acciones de superficie ó de adhesión capilar preceden, pues, siempre á la reacción química, si ésta ha de efectuarse; cuanto más intensa es esta adhesión, más probabilidades hay de que provoque y favorezca por un contacto prolongado á la reacción química, cuando esta reacción es posible.

Entre los notables fenómenos de *teñido* que se observan en el suelo, debe citarse el que se refiere á la adherencia de la materia orgánica á los granos de arena. Sin duda, cierta cantidad de humus se halla libre en el suelo y puede ser fácilmente extraída por levigación: el humus, más ligero, flota en la superficie del agua de que se embebe una muestra de tierra que se frota con el dedo, como se ha dicho á propósito de la ejecución del análisis físico por el procedimiento de Schlœsing (pág. 198). Pero, si se examinan atentamente los granos de arena, se descubren en ellos siempre indicios de humus que están pegados á la superficie de estos granos. Éstos, desecados á 100°, y luego sometidos á la acción de un calor nuevo, se ennegrecen; se descoloran si se calientan más. La materia orgánica está, pues, aplicada sobre los granos como una materia colorante que impregnase un tejido. Esta adherencia no queda vencida más que cuando se hace actuar sobre la arena, así teñida, un reactivo capaz de disolver el humus, por ejemplo una base (potasa ó amoníaco). Se provoca también la desaparición de ciertas materias colorantes apli-

cadas sobre un tejido empleando disolventes apropiados. Esta última adherencia del humus á la materia mineral explica el hecho de que las aguas que han lavado la tierra (aguas de infiltración) son generalmente muy poco coloreadas de pardo, aun cuando hayan atravesado una gruesa capa de tierra rica en humus.

Veremos después que la mayor parte de las especies microbianas aerobias que habitan en el suelo viven de preferencia en la superficie ó á una pequeña profundidad. Algunas de estas especies se fijan en la materia orgánica compleja y la hacen sufrir una serie de transformaciones que la reducen á estados cada vez más sencillos. El agua de lluvia arrastra aquellos de estos elementos que se han solubilizado y que resultan de esta degradación; tiende á hacerlos descender tanto más cuanto más difusibles son. Entonces interviene el fenómeno del teñido ó de adhesión capilar; los granos arenosos *absorben* la materia orgánica que no ha sufrido más que un principio de alteración y la retienen. Como el poder adhesivo está repartido en una superficie inmensa que crece con la pequeñez de los granos, se concibe que esta materia no baje nunca á una gran profundidad y quede estacionada en las capas superficiales del suelo: sabido es, en efecto, que el humus está generalmente localizado en estas capas. Si la simplificación de la materia orgánica por el trabajo microbiano da origen á substancias cristaloides, por consiguiente muy difusibles, éstas, bajo la influencia de las lluvias, se hunden cada vez más profundamente. No son retenidas por la atracción capilar - ó á lo menos lo son muy poco:—se las encuentra finalmente en las aguas de infiltración: tales son los nitratos y los sulfatos procedentes de la oxidación del nitrógeno y del azufre contenidos primitivamente en el humus. Así, mientras la materia orgánica está en forma coloide, es decir, próxima á la que afectaba en el vegetal, es muy poco difusible y permanece soldada con las partículas de arena tanto tiempo como dura su estado de condensación molecular.

Los fenómenos de teñido (atracción capilar) no juegan más que un papel secundario en el poder absorbente del suelo respecto de las materias salinas.

V

RESUMEN Y CONCLUSIONES PRÁCTICAS

Se pueden resumir de la siguiente manera las causas que determinan, en las tierras de labor, pero en grados diferentes, la facultad de retener las substancias fertilizantes.

1.° Cuando un suelo contiene calcáreo — que es el caso ordinario en las tierras de labor — este calcáreo interviene

como elemento básico capaz de desalojar el amoníaco y, parcialmente, la potasa de sus combinaciones con los ácidos sulfúrico y clorhídrico. Neutraliza también los ácidos libres del ácido fosfórico en el fosfato monocálcico.

El amoníaco y la potasa, ó los carbonatos de estas bases, puestos en libertad, se unen al humus y, de preferencia, á los silicatos coloidales. La intimidad de esta unión, en el caso del amoníaco, es tal que, según Pfeiffer y Einecke, las plantas se aprovechan mal de esta forma del nitrógeno, que no pueden desprender de su combinación.

2.º El fenómeno más general que entra en juego en el ejercicio del poder absorbente es el concerniente á las substituciones recíprocas de bases *entre los silicatos coloidales y las sales añadidas en forma de abonos*. Por efecto de estas substituciones, una base contenida en el silicato es puesta en libertad y reemplazada por otra base que contiene la sal añadida. La acción de la masa interviene para regular la intensidad del desalojamiento: éste podrá ser casi total si, como ocurre en los experimentos de laboratorio, el equilibrio, que tiende á establecerse primero en el contacto de la solución salina con el silicato, queda roto por efecto de la adición de un gran exceso de esta solución salina. En este caso, la substitución se efectúa equivalente por equivalente, como cuando se trata de una doble descomposición química entre dos sales, en la cual una de las dos bases es capaz de formar con uno de los dos ácidos un compuesto insoluble. Pero, prácticamente, la substitución total de la base de un silicato nunca es alcanzada, porque la masa química de las soluciones salinas añadidas en forma de abonos es incomparablemente menor que la masa de los silicatos coloidales contenidos en casi todas las tierras: las substituciones de bases no pueden ser, pues, más que parciales.

¿Se puede afirmar que estas substituciones de bases en los silicatos coloidales son siempre imputables á reacciones químicas? Nunca se repetirá demasiado que se impone una gran reserva sobre este punto, y que la interpretación de este fenómeno debe darse con mucha prudencia. En realidad—y conviene insistir en esto—nunca se consigue la substitución de la totalidad de la potasa, por ejemplo, en un sili-

cato zeolítico, aun después de una agitación prolongada con una disolución salina; tampoco se puede privar á una solución de potasa de la totalidad de su álcali, agitándola con tierra, cualesquiera que sean la duración del contacto y el estado de concentración de las soluciones empleadas. Rümpler, agitando muchas muestras de tierra con agua de cal ó con soluciones de cloruro cálcico, ha obtenido resultados que demuestran que la cantidad de potasa desalojada en los dos casos es la misma. Según este autor, la potasa así disuelta se encontraría en el suelo en una forma determinada, perteneciente á un silicato zeolítico. Observemos que, en todos los experimentos en que se pone en contacto la tierra con una disolución salina, la alúmina de los silicatos no entra en reacción, en el sentido de que nunca es desalojada: esto confirma la interpretación que hemos dado de la estructura de los silicatos en general (pág. 51). Se deben considerar los silicatos que contienen alúmina, no como sales dobles de aluminio y potasio, ó de aluminio y calcio, etc., sino como alúmino-silicatos de potasio ó de calcio, etc.: el ácido común de todas estas sales es el *ácido alúminosilícico*.

Si se admite para un silicato hidratado, como la arcilla, ya sea la fórmula de constitución de Glinka (pág. 72), ya la siguiente propuesta por Maquenne:

$$Al^2O^3.\,2SiO^2.\,2H^2O = O\left\langle \begin{array}{l} Si - O - O - Al\left\langle\begin{array}{l}OH\\OH\end{array}\right. \\ \| \\ Si - O - O - Al\left\langle\begin{array}{l}OH\\OH\end{array}\right. \end{array}\right.$$

se puede pensar que esta substancia posee, á la vez, propiedades básicas y propiedades ácidas, y que estas últimas dominan á causa de la proximidad del grupo Si^2O^5.

Pukall (1910) ha indicado para la arcilla la fórmula siguiente:

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\qquad\quad OH \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ | \\ OH - Si - O - O - Al\diagdown \\ \qquad\quad \| \qquad\qquad\qquad\quad\ \ \rangle O \\ OH - Si - O - O - Al\diagup \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ | \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad OH \end{array}$$

Estos esquemas explican ciertamente muchas particularidades que presentan los fenómonos de absorción, pero la disposición de sus agrupaciones es todavía muy hipotética.

Según estas fórmulas, la arcilla debería poder contraer, con las bases y con los ácidos, combinaciones que el agua disociaría fácil-

mente. Pues bien, si la arcilla está dotada de propiedades *absorbentes* notables, en cambio fija bastante mal las bases, suponiendo de todos modos que sea pura y no constituya más que un silicato alumínico hidratado. De hecho contiene siempre potasa desalojable, como se sabe, por la cal, cuyo calcio reemplazaría á dos ó más átomos de hidrógeno de los grupos (OH). Generalizando este razonamiento, se puede concebir que los silicatos zeolíticos contienen un gran número de oxhidrilos, y que su poder absorbente respecto de las bases es precisamente debido á su carácter polibásico.

3.° Todos los fenómenos que caracterizan al poder absorbente, y de los cuales la mayor parte tienen un aspecto químico, van siempre precedidos de fenómenos puramente físicos, atribuíbles á acciones capilares ó á atracciones de superficie: á veces estas atracciones no se completan por una combinación química y solamente hay *adsorción* de la substancia salina; otras veces, por efecto de un contacto prolongado, se manifiesta una reacción que entra en una de las dos categorías precedentes.

Se ve, pues, cuán numerosos y cuán complejos son los factores del poder absorbente. Así, no deben considerarse las nociones expuestas en este capítulo más que como *resúmenes teóricos*, capaces de hacer comprender el sentido de ciertas reacciones, realizables en el laboratorio, donde se procura no introducir más que un número restringido de variables en un fenómeno que en realidad contiene una infinidad.

Desde el punto de vista práctico, se puede afirmar que un suelo *que contiene una fuerte proporción de silicatos coloidales, y que es rico en humus, posee un poder absorbente considerable; las materias fertilizantes que se le confíen quedarán en las capas superiores del suelo, donde las raíces pueden tomarlas.*

Se comprende que, después de una abundante aplicación de abonos solubles, el poder absorbente quede satisfecho, y que si la vegetación no absorbe las substancias así fijadas, el suelo alcance en cierto modo *su punto de saturación* respecto de las materias que habrá tomado de los abonos. En tanto que este estado de saturación no sea sobrepujado, lo que por lo demás es excepcional, el suelo resiste bien, como hemos visto, los lavados que ocasiona el agua de lluvia. Sin

embargo, la cal, la magnesia, la sosa, el ácido sulfúrico, son substancias que en general retiene mal; el cloro y el ácido nítrico son substancias que no retiene de ninguna manera.

Según las nociones relativas á la acción de la masa, es claro que la adición respetida de ciertas sales solubles favorecerá, por recíproca substitución, la eliminación de ciertas bases. Sabido es, en efecto, que el empleo de abonos potásicos y amoniacales determina una pérdida correspondiente de cal en las aguas de infiltración, pérdida tanto mayor cuanto más abundantes hayan sido los abonos aplicados.

Se ve también que ciertas sales, poco ó nada útiles á los vegetales, como el cloruro sódico, provocarán, por su contacto con algunos silicatos, el desalojamiento de bases útiles, como la potasa, en éstos contenida. La potasa se encontrará, pues, á disposición de las raíces en una forma soluble, preferible á la que afectaba en el mineral de donde fué expulsada por la intervención de la sosa. Los buenos efectos obtenidos á veces por la adición de sal marina, empleada sola ó mezclada con otros abonos, son atribuíbles al desalojamiento de la potasa en los silicatos coloides. No hay que decir que un exceso de cloruro sódico ocasionaría la muerte de las plantas, y que esta manera de movilizar la potasa presentaría graves inconvenientes, tanto más cuanto muchos vegetales son particularmente sensibles á la acción perjudicial de la sal marina. Si la constitución química de una tierra desempeña un papel capital respecto del poder absorbente, es preciso también tener en cuenta *la estructura física* de esta tierra. Las tierras ligeras, arenosas ó calcáreas, fácilmente permeables, poseen un débil poder absorbente: por esto no conviene abonarlas más que en una época en que los vegetales que en ellas viven puedan utilizar los abonos.

CAPÍTULO X

ANÁLISIS QUÍMICO DE LA TIERRA DE LABOR

Objeto del análisis químico.—Elementos asimilables.—Dificultades que se encuentran cuando se quiere definir el grado de asimilabilidad de un elemento.—Reacción del suelo.—Determinación del agua.—Determinación de la materia orgánica y del carbono en particular.—Determinación del nitrógeno orgánico, del nitrógeno nítrico, del nitrógeno amoniacal.—Determinación de la totalidad de los elementos minerales.—Substancias minerales de carácter ácido.—Substancias minerales de carácter básico.—Análisis racional de las tierras mediante el agua cargada de gas carbónico.—Interpretación de los análisis físico y químico de los suelos.

Objeto del análisis químico.—En el presente capítulo vamos á buscar cuáles son los procedimientos susceptibles de ilustrarnos sobre la fertilidad del suelo, y de permitirnos determinar la suma de substancias útiles á la planta que este suelo contiene.

No hay que confundir respecto del objeto que nos proponemos: no se trata, en efecto, de exponer aquí, con todos los pormenores necesarios para su ejecución, los métodos analíticos que conducen á reconocer y determinar con exactitud tal ó cual elemento de fertilidad: el lector puede consultar respecto de este tema los numerosos tratados de análisis químico publicados tanto en Francia como en el extranjero. En las siguientes páginas no hablaremos más que de la acción sobre la tierra de labor de los reactivos capaces de poner de manifiesto y determinar la *fracción útil* para la planta de un elemento determinado, indispensable para su existencia, y

esto sin entrar en el pormenor de las manipulaciones, á veces bastante complicadas, que permiten obtener el resultado buscado. La exposición actual será, ante todo, *un estudio crítico de los procedimientos empleados más generalmente en el análisis químico de los suelos.*

Elementos asimilables. — El problema que se propone resolver el análisis químico es doble. Es necesario, por de pronto, reconocer la presencia en un suelo dado de los elementos reputados indispensables para el desarrollo de la planta y evaluar su peso total. Esta primera parte del problema es á veces larga en su ejecución, pero siempre es fácil. Se reprochará inmediatamente á este método de análisis el suministrar datos poco instructivos, teniendo en cuenta que los métodos utilizados para alcanzar el objeto consisten sobre todo en el empleo de reactivos enérgicos, que actúan á una temperatura á menudo elevada y en corto espacio de tiempo: estos métodos parecen, *a priori*, muy alejados de los que la planta pone en acción para apoderarse de los elementos necesarios á su existencia.

Sin embargo, el conocimiento del aprovisionamiento *total* de las substancias nutritivas contenidas en el suelo, puede ser muy útil. A veces se verá el agrólogo conducido, después del examen de las cifras obtenidas, y antes de toda adición de abonos, ya sea á modificar el estado físico del suelo por procedimientos mecánicos apropiados, ya sea á incorporar á este suelo ciertas *enmiendas* destinadas á vencer la inercia de tal ó cual substancia. Este método de análisis *global* de las substancias minerales, aplicado á la tierra de labor, no es otro, en realidad, que el que se practica en el análisis de las rocas. Y como una tierra cualquiera no es más que un conjunto de fragmentos de rocas, es ventajoso, en muchos casos, poder comparar su análisis con el de las rocas de las cercanías, á fin de poder ver sus analogías ó sus diferencias de composición.

La segunda parte del problema, por el contrario, es de muy penosa ejecución: se trata de saber cuál es, en un momento dado, *la fracción* de estos elementos indispensables sobre cuya presencia se podrá contar cuando se trate de un cultivo determinado. No es temerario decir que tal debe ser el objeto casi exclusivo del análisis racional de una tierra.

Pero conviene añadir inmediatamente que, á pesar de los esfuerzos considerables que se han intentado en esta dirección desde más de sesenta años, y á pesar de la ingeniosidad de los procedimientos preconizados respecto de este punto, este segundo problema es muy difícil de abordar, y los medios que ponemos en acción para resolverlo son, generalmente, de imperfección notoria.

Dificultades que se encuentran cuando se quiere definir y determinar el grado de asimilabilidad de un elemento.—Cuando se trata de apreciar la fracción asimilable de las materias minerales que contiene un suelo determinado, se ha hecho, hasta ahora casi siempre, uso de reactivos enérgicos. Los ácidos fuertes, en particular, son de empleo corriente en este género de investigaciones: ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico concentrados ó diluídos según ciertos convenios. Observemos luego cuán poco racional es, *a priori*, emplear semejantes agentes, ninguno de los cuales se encuentra normalmente en el suelo.

Sin embargo, se puede responder á esta objeción. En efecto, si un reactivo, tal como los que acabamos de citar, empleado en condiciones fijas de concentración y de temperatura, es capaz de extraer de una muestra de tierra una cantidad de ácido fosfórico, por ejemplo, precisamente igual ó próxima á la que una cosecha determinada habrá quitado del suelo, este reactivo podrá dar informaciones interesantes cada vez que se trata de apreciar *la fracción* de ácido fosfórico utilizable actualmente por la planta que se desea cultivar. El empleo del análisis químico, combinado con la observación directa en el campo de cultivo, constituye, en efecto, una práctica recomendable. Por esto tales procedimientos aproximados tienen, sin duda, algún valor. Pero es preciso saberlos manejar con prudencia, porque si el reactivo en cuestión responde al objeto respecto de una planta, fracasará muy probablemente cuando se aplique á otra planta cuyas necesidades no sean las mismas que las de la primera.

Reactivos racionales.—Hemos demostrado, en muchos puntos del capítulo VII relativo á la constitución química de la materia mineral de los suelos, la influencia que ejerce, sobre la disolución de una substancia determinada contenida en una muestra de tierra, la concentración de un mismo ácido.

la duración de su acción y la elevación de la temperatura. Por esto debe preguntarse si es posible idear métodos de ataque más racionales, capaces de informar respecto de la riqueza actual de un suelo en materias fertilizantes asimilables. En otros términos, ¿se puede imitar el mecanismo natural que engendra en el suelo los materiales solubles?

A priori debería responderse negativamente. En efecto, las soluciones del suelo se elaboran casi siempre en presencia de escasas cantidades de agua. Una tierra, fuera de los períodos prolongados de lluvias, contiene la quinta ó la cuarta parte de su peso de agua. Además, los reactivos artificiales que empleamos para disolver tal ó cual materia salina envuelven completamente á los elementos de la muestra de tierra que se pone en su contacto, los bañan en todas sus partes; mientras que las raíces de una planta, cualquiera que sea su grado de finura, no entran nunca en relación con todas las partículas del terrón en que penetran.

Hechas estas salvedades, debe convenirse en que el empleo de reactivos tales como los que actúan normalmente en el suelo parece el único racional. Así es que el agua y el gas carbónico aparecen en seguida como los agentes principales, si no exclusivos, del análisis *natural* de la tierra de labor: á estos agentes, pues, es á quienes convendría dirigirse. Hemos visto el partido que Schlœsing hijo había sacado de su acción para fijar la composición y la concentración de las disoluciones del suelo (pág. 230). Muchos experimentos se han intentado ya en este sentido, en los que se ha determinado cuáles eran las proporciones de ácido fosfórico, de potasa, de cal, etc., que el agua carbónica podía desalojar. Un estudio metódico y muy interesante ha sido hecho en este orden de ideas por E. A. Mitscherlich en 1907: hablaremos de él más adelante.

Sin embargo, cuando se quiere proceder de esta manera, es necesario, á pesar de todo, hacer algunas convenciones. Sea lo que fuere, es de desear que se abandonen la mayor parte de los procedimientos que se fundan en el empleo de reactivos enérgicos, absolutamente extraños al suelo, procedimientos aplicados casi siempre de una manera uniforme y rutinaria al análisis no importa de qué tierras. Hemos de reconocer, por otra parte, que, desde algunos años, muchos analistas hacen esfuerzos muy dignos de alabanza para librar á la ciencia agrícola de algunos métodos anticuados.

Dividiremos el presente estudio de la siguiente manera: I. *Reacción del suelo;* II. *Determinación del agua; pérdida por calcinación;* III. *Determinación de la materia orgánica total y del carbono en particular;* IV. *Determinación del nitrógeno orgánico, nítrico y amoniacal;* V. *Deter-*

minación de la totalidad de los elementos minerales; VI. *Determinación de las substancias minerales de carácter ácido* (PO^4H^3, Cl, SO^4H^2, SiO^2); VII. *Determinación de las materias minerales de carácter básico* (CaO, MgO, K^2O); *análisis racional de las tierras por el agua carbónica;* VIII. *Interpretación de los análisis físico y químico de los suelos.* (Recordaremos que los métodos de toma de muestras de la tierra de labor han sido indicados á propósito del análisis físico [pág. 196].)

I

REACCIÓN DEL SUELO

Cuando un suelo contiene un exceso de humus y le falta el calcáreo ó sólo contiene una proporción insuficiente, entra en la categoría de las *tierras ácidas*. Esta acidez puede comprobarse á menudo mediante el papel sensible de tornasol azul. Basta triturar en un poco de agua unos treinta gramos de tierra y dejarla en reposo algunos instantes para comprobar que el papel sensible, inmergido en el líquido que hay encima del magma térreo, toma un tinte rojizo ó rojo marcado. Cuando el suelo es calcáreo, esto es, cuando da marcada efervescencia en contacto con un ácido, el suelo generalmente tiene reacción neutra y un papel de tornasol, rojo ó azul, no cambia de color con su contacto.

La determinación cualitativa de la acidez ó de la alcalinidad de una tierra presenta una importancia de primer orden. Toda tierra ácida será impropia para el gran cultivo mientras no haya sido encalada ó adicionada de marga. El examen de la flora espontánea permite formar á menudo concepto de la reacción del suelo: los *brezos*, los *helechos*, las *aulagas*, las *retamas*, entre otros vegetales, se desarrollan en las tierras ácidas.

Para medir la acidez ó la alcalinidad de una tierra, se puede emplear el procedimiento siguiente, debido á Pagnoul. Este autor

define la reacción de la tierra comparando la cantidad de amoníaco libre que se desprende cuando se calienta, primero solo, después con 5 gramos de la tierra que se examina, un líquido preparado del siguiente modo: á 50 centímetros cúbicos de agua se añade una cantidad conocida, y siempre la misma, de amoníaco libre y de una sal amónica cualquiera. Se principia por destilar, *en blanco,* un volumen conocido del reactivo, y se recoge el líquido que destila en ácido sulfúrico valorado, empleado en exceso á fin de que no haya pérdida de amoníaco por evaporación. Una valoración efectuada con una solución de sosa, de valor conocido, da la cantidad de ácido sulfúrico que ha quedado libre y, por diferencia, la que ha sido neutralizada por el amoníaco. Se hace una operación idéntica tomando el mismo volumen del reactivo inicial con el que se mezclan 5 gramos de tierra. Si la cantidad de amoníaco que se ha desprendido en esta segunda operación es menor que en la operación hecha en blanco, esto significa que una parte del amoníaco ha sido retenida por una substancia ácida que la tierra contenía. Si, por el contrario, hay más amoníaco que en la operación hecha en blanco, debe pensarse que cierta cantidad de sal amónica ha sido descompuesta por la tierra: sólo el calcáreo puede haber actuado sobre esta sal desalojando el amoníaco en estado de carbonato volátil. Se deduce de esto que la tierra es *básica,* es decir, que contiene carbonato cálcico. Se podría también, en rigor, deducir de esta determinación el peso del calcáreo contenido en la muestra analizada. Bueno es, á fin de que los resultados sean valederos, procurar que el volumen del líquido que destila sea siempre el mismo.

Esta operación es muy fácil de efectuar y siempre es instructiva. Observemos, de paso, que, en el ensayo *en blanco* antes indicado, se recoge siempre un poco más de amoníaco del que existe en estado libre en el líquido empleado: esto se debe á la alcalinidad del vidrio del matraz en que se hace la destilación.

Citemos además los siguientes procedimientos de valoración:

A. Albert (1909) emplea un método análogo al precedente. De 20 á 50 gramos de tierra, bien desleídos en 200 centímetros cúbicos de agua, son adicionados de un volumen conocido de agua de barita valorada y después de 10 gramos de cloruro amónico. Se destila y se recoge el amoníaco desprendido en el ácido sulfúrico valorado. Se obtendrá tanto menos amoníaco en la destilación cuanto menos barita quede libre: cuanto más ácida sea una tierra más barita neutralizará. Se puede así conocer el grado de acidez de un suelo. Este procedimiento tiene una objeción. La ebullición de una tierra cualquiera con una base enérgica, como la barita, aun en solución diluída, desprende pequeñas cantidades de amoníaco procedente del desdoblamiento de la materia orgánica nitrogenada de la tierra (pág. 292).

Süchting, para determinar el grado de acidez de una tierra, evalúa la cantidad de carbonato cálcico que esta tierra puede descomponer. En un matraz se ponen de 10 á 20 gramos de materia

con un exceso de calcáreo cuyo peso es conocido; se llena la mitad del matraz de agua destilada y se hace pasar por ella una corriente de hidrógeno para eliminar el gas carbónico producido. Se vierte en seguida ácido clorhídrico en el matraz y se expulsa el gas carbónico que se recoge en tubos absorbentes. La diferencia entre la cantidad de calcáreo determinada en esta segunda operación, y la cantidad de calcáreo introducida antes, indica la proporción de carbonato cálcico descompuesto por los ácidos naturales del suelo y, por consiguiente, el grado de acidez de éste.

Von Sigmond (1907) designa con el nombre de *basicidad de un suelo* la cantidad de ácido, expresada en miligramos de ácido nítrico (N^2O^5), necesarios para valorar 25 gramos de tierra.

Veitch (1902) recomienda un procedimiento de valoración mediante el agua de cal, cuyo principio es el siguiente: Se añaden volúmenes crecientes, pero bien medidos, de este reactivo á una serie de porciones de tierra del mismo peso, y se busca por tanteos con qué volumen de agua de cal aparece la coloración rosa de la ftaleína después de un contacto de muchas horas. Se puede así aproximar la valoración entre límites muy estrechos y conocer el grado de acidez de la tierra; se apreciará de este modo cuál es la cantidad de calcáreo que deberá añadirse á un suelo dado para hacerlo alcalino.

El mismo autor distingue dos *suertes de acidez del suelo*. La primera es la *acidez activa*, debida á la presencia de compuestos orgánicos ó inorgánicos de reacción francamente ácida. Este grado de acidez puede ser evaluado mediante el procedimiento antes indicado. La segunda es la *acidez inactiva*, que los indicadores ordinarios no ponen de manifiesto y que es atribuíble á la presencia en el suelo de silicatos hidratados ó coloidales (zeolitas) capaces de unirse con las bases alcalinas ó alcalinotérreas disueltas. El suelo no se vuelve alcalino más que cuando la afinidad de estas bases queda satisfecha por efecto de su unión con dichos silicatos.

La determinación de la acidez del suelo ó de su basicidad puede efectuarse de una manera muy simple mediante la operación de la *calcimetría* de que hablaremos más tarde.

II

DETERMINACIÓN DEL AGUA

Cuando una tierra húmeda permanece algún tiempo en contacto con la atmósfera en capa delgada, pierde más ó menos rápidamente la mayor parte del agua que estaba interpuesta entre sus partículas; llega, pero á menudo al cabo de

muchos días, á un peso casi constante que sólo es modificado por las variaciones del estado higrométrico y de la temperatura del aire ambiente. Las oscilaciones de peso, por la influencia de estos factores, dependen de la naturaleza de los componentes de la tierra. Hemos estudiado, con los pormenores necesarios, esta higroscopicidad de la tierra vegetal (página 156). En principio, la tierra se llama *seca* cuando se conserva en frío durante cierto tiempo en un desecador de ácido sulfúrico.

Desecación de la tierra. Según Van Bemmelen, se debe tomar como término de comparación *la tierra desecada á una temperatura de unos 15° sobre el ácido sulfúrico, hasta peso constante;* el agua que todavía queda en la tierra así tratada, es *agua fuertemente combinada.* No hay que decir que la muestra debe pesarse en un recipiente cerrado, á fin de evitar una reabsorción de humedad durante la operación. La tierra así preparada es la que se somete á las diferentes manipulaciones del análisis químico. Algunos autores prefieren emplear la tierra desecada simplemente al aire, en capa delgada, determinando en una parte de ella la cantidad de agua higroscópica de que está cargada.

Cuando se quiere conocer el grado de humedad de un suelo en el campo, es indispensable, después de haber tomado las muestras en diferentes puntos del mismo y á diferentes profundidades, poner estas muestras en frascos bien cerrados antes de llevarlas al laboratorio. No se deberá utilizar la tierra de la superficie, cuyas variaciones, respecto de la humedad, son demasiado directamente influídas por las condiciones exteriores de temperatura y de agitación del aire. Se abrirá el suelo á la profundidad de 5 á 6 centímetros y del fondo del hoyo se tomará la muestra.

La desecación de una tierra á una temperatura más elevada (100 á 110°), sobre todo si se mantiene largo tiempo esta temperatura, corre siempre el peligro de alterar algo la materia. En efecto, el agua *fuertemente combinada* está unida en gran parte con los coloides del suelo (humus, zeolitas); una muy pequeña parte corresponde á los silicatos cristalizados (Van Bemmelen). Se podrá, en principio, desecar la tierra á una temperatura tanto más elevada cuanto más pobre sea en humus y, recíprocamente, deberá abstenerse de calentar á más de 100° una muestra rica en materia orgánica. En efecto, á partir de la temperatura de 100°, la materia orgánica nitrogenada se altera; se forma cierta cantidad de amoníaco y se desprende tanto más fácilmente cuanto más calcáreo contiene la tierra. Además, la constitución mineral de esta tierra se modifica porque los silicatos zeolíticos pierden ya agua á esta temperatura. También es preciso notar, como ya hemos dicho anteriormente, que,

la mayor parte de las veces, reina una gran incertidumbre sobre la verdadera temperatura de la estufa, donde se efectúa la desecación. En diferentes puntos de este aparato con frecuencia existen diferencias notables. Aun suponiendo que la temperatura de la tierra en la estufa, sea exactamente de 100°, por ejemplo, la proporción de agua perdida en estas condiciones es siempre algo menor que si se efectuase la desecación, á esta misma temperatura, en el seno de una corriente de un gas inerte seco (pág. 159). Se desprecia frecuentemente el error, bastante pequeño, que resulta de una desecación hecha sólo en la estufa, con tal que se conozca de la manera más exacta posible la temperatura á que ha sido realmente calentada la tierra.

La desecación de la tierra se efectúa, generalmente, entre 100 y 120°; algunos autores la elevan hasta 140°. Pero, á esta temperatura, á lo menos en ciertos suelos, hay principio de descomposición y, si se opera en contacto con el aire, se desprenden pequeñas cantidades de gas carbónico.

En cuanto al método eléctrico, destinado á determinar la proporción de agua del suelo, propuesto por Whitney y Briggs, presenta dificultades de ejecución y un grado de incertidumbre talès, que no puede ser empleado de una manera usual.

Pérdida por calcinación.—Con objeto de expulsar, no solamente la totalidad del agua, sino también de eliminar igualmente toda materia combustible, se calienta la tierra, desecada primero á 100°, á la temperatura del rojo sombra. La pérdida así obtenida es la resultante de numerosos fenómenos que aquí nos limitaremos á indicar: 1.°, esta pérdida comprende cierta cantidad de agua unida á los silicatos zeolíticos y comparable á las moléculas de agua de cristalización que contienen muchas sales hidratadas, agua que no se desprende más que á una temperatura á veces bastante elevada (á más de 200°); 2.°, la tierra calcinada en contacto con el aire pierde agua que procede de la combustión del hidrógeno de las materias orgánicas; 3.°, se desprende gas carbónico procedente de la oxidación del carbono; 4.°, los carbonatos alcalinotérreos (calcio y magnesio) ceden, según la mayor ó menor elevación de la temperatura, una parte de gas carbónico; 5.°, las materias orgánicas nitrogenadas son destruídas; 6.°, los humatos son convertidos en carbonatos, los sulfuros en sulfatos, los complejos fosforados en fosfatos.

III

DETERMINACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA TOTAL Y DEL CARBONO EN PARTICULAR

A. Disolución del humus. — Es indispensable, en la mayoría de los casos, conocer la riqueza de una muestra de tierra dada en materia orgánica. Antes de describir algunos de los procedimientos empleados en esta determinación, haremos las observaciones siguientes. Así como existe en el suelo una fracción, muy difícil de definir, como veremos, de ácido fosfórico, de potasa, de nitrógeno, inmediatamente utilizable por los vegetales, así también no hay en el suelo más que una fracción de materia orgánica que pueda llamarse *activa,* es decir, capaz de oxidarse rápidamente en contacto con el aire y con ciertos fermentos, produciendo gas carbónico. El resto constituye un depósito que resiste á menudo durante mucho tiempo á los agentes naturales de oxidación. Los métodos empleados para la determinación del humus en totalidad ó del carbono total son impotentes para suministrarnos indicaciones sobre el valor de esta fracción muy oxidable. Sin embargo, como lo que se ha convenido en llamar la *materia negra del suelo* desempeña, respecto de los vegetales, un papel múltiple, directo ó indirecto, muy importante (página 282), todo método que permita apreciar lo más exactamente posible el peso total de esta materia podrá prestar reales servicios.

La determinación del carbono por *vía seca* (véase más adelante) es el método mejor; pero esta determinación es de ejecución larga y requiere mucho cuidado. Por esto, á menudo se prefiere extraer el humus mediante un disolvente apropiado y averiguar su peso.

El humus es soluble en los álcalis, potasa y amoníaco; y el último es el que generalmente se emplea. Si la tierra es calcárea, se trata un peso conocido de esta tierra, de 10 á 20 gramos según su colora-

ción, por el ácido clorhídrico diluído á fin de eliminar el calcáreo; luego se lava con agua destilada hasta desaparición de la acidez. Puesta entonces la muestra en un embudo, cuyo pico está obturado con un poco de amianto, se vierte en el embudo agua amoniacal (se diluye el amoníaco líquido puro del comercio con un volumen de agua) y se recibe en una cápsula tarada el líquido pardo que escurre. El tratamiento por el agua amoniacal debe continuarse mientras el líquido que escurre tenga coloración parda. Se evapora á sequedad la solución amoniacal, se pesa la cápsula, luego se calienta hasta desaparición de toda la materia orgánica y, después del enfriamiento, se pesa de nuevo. La diferencia entre las dos pesadas da el peso del humus. La incineración es indispensable, porque el amoníaco disuelve siempre materias fijas (Grandeau).

Si el humus es ácido (tierras desprovistas de cal), puede prescindirse del tratamiento previo de la muestra por un ácido. Basta, en este último caso, emplear un peso relativamente pequeño de substancia (2 á 3 gramos).

Suponiendo que el humus, descontadas las cenizas, contiene por término medio 58 por 100 de carbono, basta, como ha indicado Wolff, multiplicar la riqueza en carbono orgánico total de la tierra por el coeficiente 1,724 para tener su riqueza en humus.

Conviene añadir que este procedimiento de disolución del humus por el amoníaco, tal como se acaba de exponer, dista mucho de dar siempre la totalidad de la materia negra.

Se ha propuesto distinguir el humus fácilmente oxidable del humus poco oxidable tratando la muestra de tierra por una solución caliente de carbonato sódico medio saturada: el humus así disuelto constituiría la proporción de la materia orgánica del suelo más oxidable; bastaría precipitar el líquido por un ácido. El humus llamado *insoluble* se disolvería por medio de una disolución de potasa cáustica y se precipitaría por un ácido. Esta distinción, ó mejor dicho el procedimiento que sirve para establecerla, parece algo arbitraria.

Raulin ha dado un procedimiento de determinación de la materia húmica fundado en la oxidación de esta materia por medio del bióxido de manganeso por vía húmeda.

B. Determinación del carbono total.—Como es casi imposible distinguir unas de otras las diversas formas de la materia orgánica del suelo, y como los procedimientos de determinación del humus por disolución son bastante imperfectos, es preferible, para determinar el humus contenido en un suelo determinado, acudir á la determinación del carbono total. De la cifra obtenida es fácil pasar al humus suponiendo, como hemos dicho poco antes, que este humus con-
iene 58 por 100 de carbono.

Se puede determinar el carbono total *por vía seca* ó *por vía húmeda*.

Vía seca.—No describiremos el procedimiento en sus pormenores; es, en todo, idéntico al que se emplea en la determinación del carbono de una substancia orgánica definida. La muestra de tierra (5 á 10 gramos) se pone en una navecilla y se deseca á la temperatura ordinaria en el desecador de ácido sulfúrico durante muchos días. Se introduce luego la navecilla en un tubo de combustión que contiene una columna de óxido de cobre de 40 centímetros de longitud, ó mejor cromato de plomo, precedida de una columna de cobre metálico en granos de 20 centímetros de longitud. Se efectúa la operación en una corriente de oxígeno y se absorbe el gas carbónico desprendido durante la combustión en tubos de potasa apropiados. Cuando el contenido de la navecilla no tiene ya ningún tinte negruzco, la operación ha terminado. El peso del gas carbónico obtenido es generalmente algo superior al que corresponde á la proporción de carbono que contiene en forma de humus la muestra examinada. En efecto, si la tierra sometida al análisis contiene carbonatos (de calcio y de magnesio), cierta cantidad del ácido carbónico de éstos se desprende por efecto de la temperatura á que se calienta la navecilla en una proporción que no puede ser evaluada *a priori*, porque depende esencialmente del grado de calor y de la duración de la operación. Cuando ha terminado la determinación se pasa el contenido de la navecilla á un pequeño matraz que contiene un poco de agua y cuyo cuello está cerrado por un buen tapón de caucho con tres agujeros. El primero está atravesado por un tubo unido á un pequeño refrigerante ascendente, enlazado con dos tubos de pómez sulfúrica destinados á retener el vapor de agua, y después con un tubo de Liebig con solución de potasa y con un tubo en U con cal sodada. El segundo agujero del tapón lleva un tubo terminado con un embudo de llave lleno de ácido clorhídrico diluído. Por el tercer agujero del tapón pasa un tubo que llega hasta el fondo del matraz y que está unido con un frasco de Mariotte que suministra burbuja á burbuja aire exento de gas carbónico. Montado el aparato, se hace circular aire para asegurarse del buen funcionamiento de todas sus piezas; luego se abre la llave del embudo: el ácido clorhídrico pasa al matraz y ataca á los carbonatos que no ha descompuesto el calor. Se calienta suavemente el matraz hasta ebullición para expulsar la totalidad del gas carbónico disuelto en el agua. Se deja de calentar y se hace circular la corriente de aire durante algunos minutos. El pequeño refrigerante que está unido al matraz está destinado á condensar el agua que vuelve á caer en él; los tubos de pómez sulfúrica absorben el vapor de agua. La pesada de los dos últimos tubos (lejía de potasa, cal sodada) da el peso del gas carbónico de los carbonatos que todavía contiene la tierra después de efectuada la combustión. Si, por otra parte, se hace la misma determi-

nación con una muestra de la misma tierra, simplemente desecada sobre ácido sulfúrico como la muestra que ha servido para la combustión, se obtiene *la totalidad* del gas carbónico contenido en los carbonatos. La diferencia entre las dos determinaciones de gas carbónico se expresa en carbón ($CO^2 \times \frac{3}{11} = C$), y el peso de este carbón se descuenta del que ha dado la combustión. Se puede, pues, conocer muy exactamente el carbono sólo de la materia húmica.

El procedimiento *de determinación de los carbonatos* de la tierra, que acabamos de exponer, da resultados muy correctos y debe ser empleado cada vez que se quiera conocer el peso *total* de estos carbonatos (cal y magnesia), *sin hacer distinción respecto del tamaño de sus granos*. Este procedimiento tiene el inconveniente de ser algo largo. Para hacer una determinación rápida sirven generalmente los aparatos llamados *calcímetros* (véase más adelante). Se podrían también emplear los pequeños matraces de vidrio delgado, provistos de dos pequeñas alargaderas, una con pómez sulfúrica y otra con ácido clorhídrico diluído, que se usan para determinar la cantidad de carbonato cálcico que contiene un calcáreo natural (aparato Bobierre).

Relativamente á la determinación del ácido carbónico de los carbonatos en ciertas tierras ricas en materias húmicas, se ha aconsejado no calentar el matraz en que actúa el ácido, porque la materia húmica parece experimentar una descomposición parcial que, produciendo ella misma cierta cantidad de gas carbónico, sería causa de resultados erróneos. Basta entonces hacer pasar más largo tiempo la corriente de aire por el aparato, á fin de desalojar en frío la totalidad del gas carbónico contenido en el matraz después de la descomposición de los carbonatos por el ácido clorhídrico.

Vía húmeda.—Los procedimientos de determinación del carbono por vía húmeda se fundan esencialmente en el hecho de que el ácido crómico adicionado de ácido sulfúrico ó, lo que es lo mismo, una mezcla de bicromato potásico y ácido sulfúrico concentrado, desprende oxígeno en caliente: este oxígeno quema las materias carbonadas que se ponen en su contacto. Estos procedimientos de vía húmeda no presentan ventaja alguna sobre los de vía seca. Hasta con frecuencia la combustión es incompleta; en todo caso siempre es bastante difícil de efectuar y no se aprecia bien el término de la operación. Sin embargo, estos procedimientos son aplicables en ciertos casos en que no lo son los de vía seca: por ejemplo, si se trata de una tierra muy húmeda, ó muy rica en humus, que no se quiera privar de su agua de imbibición.

Generalmente se acude á estos procedimientos cuando se trata de determinar el carbono de ciertos líquidos que han servido para el cultivo de microorganismos.

En vez de emplear el ácido crómico como oxidante, se puede usar

el permanganato potásico en solución alcalina: durante el primer estadio de la operación, el carbono del humus se convierte parcialmente en gas carbónico que se combina con el álcali, y en parte en oxalato. En el segundo estadio, se añade ácido sulfúrico diluído que desprende el gas carbónico del carbonato y descompone el oxalato en contacto con el exceso de permanganato (Warington y Peake). Este procedimiento comporta las mismas incertidumbres que el procedimiento del ácido crómico.

IV

DETERMINACIÓN DEL NITRÓGENO ORGÁNICO, DEL NITRÓGENO NÍTRICO Y DEL NITRÓGENO AMONIACAL

Desempeñando el nitrógeno un papel capital respecto de las plantas, es necesario determinarlo con exactitud. No faltan métodos exactos que permitan conseguir este objeto.

Pero aquí, como para todos los elementos indispensables á la vegetación, se presenta la cuestión de saber *cuál es la fracción del nitrógeno total* de un suelo que es inmediatamente asimilable por la planta. Hemos estudiado antes la naturaleza del nitrógeno orgánico de los suelos, y hemos visto que este nitrógeno afectaba múltiples formas, cuya existencia se comprueba con seguridad con el empleo de ácidos y de bases, pero que actualmente es imposible definir y separar unas de otras. Se admite que la forma *nítrica* del nitrógeno es la fuente principal, si no exclusiva, del nitrógeno utilizable por la mayoría de los vegetales del gran cultivo. Como diremos á continuación, la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno nítrico depende de muchos factores, entre los cuales debe ponerse la presencia del calcáreo. Se deduce de esto que la determinación del nitrógeno debe ir al lado de la del calcáreo, porque un suelo, aun muy rico en nitrógeno, puede no nitrificar si le falta el elemento básico.

Existen muchos vegetales que se desarrollan en suelos no calcáreos que contienen á veces mucho nitrógeno orgánico: no se conoce actualmente en qué forma estos vegetales apro-

vechan el nitrógeno orgánico, ó cuál es, en el complejo nitrogenado del humus, la fracción de nitrógeno á que de preferencia se dirigen.

Sea lo que fuere, la determinación del nitrógeno total es una de las más importantes que se ejecutan en el análisis químico. Proporciona datos muy interesantes sobre la cantidad y, á menudo, sobre la naturaleza de los abonos ó enmiendas que conviene aplicar al suelo, ya sea para aumentar el peso de este elemento si es poco abundante para un cultivo determinado, ya para modificar sus cualidades si forma parte de un suelo poco ó nada calcáreo.

El nitrógeno existe en el suelo en tres formas: *nitrógeno orgánico, nitrógeno nítrico* y *nitrógeno amoniacal*. Con el nombre de *nitrógeno orgánico* debe entenderse el conjunto de núcleos complejos procedentes, en primer término, de la metamorfosis del nitrógeno albuminoide, de origen vegetal ó animal. Describiremos separadamente la determinación del nitrógeno en estas tres formas, sin entrar en pormenores sobre la manera como se efectúan estas determinaciones: para ello puede consultar el lector los tratados especiales sobre la materia.

α. **Nitrógeno orgánico.**—Notemos que, si se quiere conocer el *peso total* del nitrógeno contenido en las tres formas indicadas, no hay más que una manera correcta de proceder: es la de emplear el conocido procedimiento de Dumas que consiste en quemar la materia orgánica por medio del óxido de cobre y dirigir los gases á una columna de cobre metálico destinado á descomponer los óxidos gaseosos de nitrógeno. Se recoge el nitrógeno sobre mercurio y se mide su volumen. Schlœsing ha descrito una modificación del método de Dumas que permite determinar, en una misma operación, el carbono y el nitrógeno totales de una tierra ó de una substancia orgánica cualquiera. Se mide el volumen total de los gases carbónico y nitrógeno y se separan por los procedimientos conocidos.

El procedimiento de Schlœsing es excelente; se encontrará su descripción en la obra de este autor, titulada: «*Contribution à l'étude*

de la chimie agricole» (*Encyclopédie chimique de Frémy*, París, 1885, p. 237). Pero, este procedimiento es por desgracia de ejecución larga y difícil y no podría entrar en la práctica corriente del análisis de los suelos. Permite operar con un peso de tierra marcadamente superior al que se está obligado á tomar cuando se emplea el método de Dumas propiamente dicho, lo que constituye una ventaja apreciable.

Müntz ha modificado algo este procedimiento de determinación: la única objeción que puede hacerse á esta modificación es la de que requiere también montar un aparato complicado. De todos modos, en las investigaciones muy exactas, debería acudirse al método de Müntz (A. Müntz, *Méthodes analytiques appliquées aux substances agricoles; Encyclopédie chimique de Frémy*, París, 1885, p. 159).

La determinación del nitrógeno total se efectúa de una manera muy cómoda por el procedimiento llamado de la *cal sodada*, ó por el procedimiento de Kjeldahl. Cuando se conduce bien la operación, los resultados son excelentes. Sabido es que el procedimiento de la cal sodada se funda en que los álcalis, calentados al rojo incipiente con una substancia nitrogenada, desprenden nitrógeno en estado de amoníaco, con tal que este nitrógeno se halle en la substancia en cuestión, ya sea en forma de sal amónica, ya en la de forma amídica NH^2, ó en la imídica NH. El nitrógeno terciario, ó el nitrógeno unido con el oxígeno, no se convierten más que incompletamente en amoníaco en estas condiciones. En la tierra de labor, el nitrógeno llamado *orgánico* está contenido en núcleos comparables á los de los albuminoides, como hemos dicho anteriormente; podría, pues, ser transformado en amoníaco en contacto con los álcalis. Demuestra la exactitud de esta opinión el hecho de que el procedimiento de la cal sodada da resultados casi idénticos á los que proporciona el método de Dumas ó el de Schlœsing. Se puede, pues, emplear con toda seguridad.

Es necesario emplear un tubo de vidrio algo largo (80 centímetros), si se quiere operar con 30 gramos de tierra; y es conveniente, mientras dura la operación, hacer pasar por este tubo una corriente de hidrógeno. Este gas actúa como reductor y expulsa completamente el amoníaco que se desprende. Se recibe éste en ácido sulfúrico valorado. Pres-

cindiremos de los pormenores de este análisis conocido de todos los químicos.

La única objeción que puede hacerse á este método es la de no dar el nitrógeno total, sino solamente el nitrógeno orgánico y amónico. En efecto, los nitratos que contienen la mayor parte de las tierras no son reducidos, ni aun al rojo, en contacto con la sosa, más que de un modo muy incompleto; pero, el error en menos que así se comete es poco importante por dos razones. La experiencia enseña que si un nitrato puro, calentado solo con cal sodada, no desprende más que poco nitrógeno en forma de amoníaco, este nitrato desprende mucho más si está mezclado con una materia carbonada, por ejemplo, el azúcar. Pues bien, en la tierra hay siempre carbono; por esto, durante la calefacción, cierta cantidad del nitrógeno de los nitratos pasa al estado de nitrógeno amoniacal; sin embargo, nunca se obtiene la totalidad del nitrógeno nítrico por este procedimiento. En segundo lugar, la relación entre el nitrógeno nítrico y el nitrógeno total del suelo (despreciando el nitrógeno amónico que existe, según veremos, en ínfima cantidad), es casi siempre muy pequeña, aun en las mejores tierras de labor; es de 1 á 2 por 100 en los casos más favorables á la nitrificación natural. Los nitratos no aumentan en gran proporción más que si se favorece artificialmente el fenómeno nitrificador, como ocurre en algunos experimentos de laboratorio en que se mantienen constantes la temperatura de la tierra (30 á 35 grados) y la proporción de humedad, teniendo cuidado de agitar de vez en cuando la masa para airearla del modo conveniente. Pues bien, ninguna de estas condiciones se encuentra realizada de una manera tan perfecta en la naturaleza. Por lo tanto se puede admitir que nunca hay más que una muy pequeña fracción del nitrógeno del suelo en estado nítrico. Resulta de esto que el error que se comete en la determinación con la cal sodada es casi despreciable, ya que una parte del ácido nítrico pasa al estado de amoníaco. Según ciertos autores, la totalidad del nitrógeno nítrico sería reducida al estado de amoníaco en estas condiciones.

Por otra parte, se ha perfeccionado el procedimiento mezclando la cal sodada con reductores apropiados, que permiten obtener la totalidad del nitrógeno. Entre los reductores empleados citaremos el acetato sódico, ó bien una mezcla de 6 partes de cal sodada, 7 partes de hiposulfito sódico y un poco de azufre.

El procedimiento de Kjeldahl se funda en la destrucción de la materia orgánica nitrogenada por el ácido sulfúrico concentrado á una temperatura próxima á la de la ebullición de este ácido. Todo el nitrógeno pasa al estado de sulfato amónico. Basta luego diluir con agua el líquido enfriado y

hervirlo con un exceso de sosa cáustica para hacer desprender el amoníaco que se recibe en un ácido valorado.

Las diferentes fases de la operación son probablemente las siguientes. El ácido sulfúrico deshidrata la materia orgánica, y el agua, formada en estas condiciones, se fija en el nitrógeno complejo á modo de hidrolisis, convirtiendo este nitrógeno en amónico. Además, el gas sulfuroso que se produce por la acción del carbón sobre el ácido sulfúrico favorece el fenómeno de la reducción. A fin de que el nitrógeno de una materia orgánica pase así al estado amónico, es necesario, como en la acción de la cal sodada, que este nitrógeno forme parte de la molécula en forma amidógena NH^2 ó imidógena NH, que es lo que ocurre en la tierra de labor.

Si bien en la mayoría de los casos, la simple calefacción con el ácido sulfúrico basta para convertir el nitrógeno orgánico en nitrógeno amónico, con todas las salvedades hechas sobre la naturaleza del núcleo nitrogenado, sin embargo hay casos en que esta transformación es incompleta. Por lo que toca á la tierra de labor, que es lo único de que aquí tratamos, conviene operar como sigue. Se introducen 10 gramos de tierra en un matraz de vidrio de Jena, de unos 150 centímetros cúbicos de cabida, en que se han puesto 20 gramos de ácido sulfúrico puro, mezclado con 1 ó 2 gramos de anhídrido fosfórico. Se añade luego cosa de 1 gramo de mercurio y se calienta, al principio con suavidad, después progresivamente hasta la ebullición del líquido. La masa primero se ennegrece; poco á poco se descolora casi totalmente, y se suspende la operación una hora después que el líquido ha tomado un color claro. El residuo arenoso es blanco ó ligeramente gris. La adición de mercurio tiene por objeto formar un medio reductor á causa del desprendimiento del gas sulfuroso: de todos modos, su acción, muy real y muy eficaz, es muy poco conocida; porque, en vez de mercurio, se puede emplear el óxido de este metal; la transformación también es completa. La calefacción va acompañada de violentas sacudidas; es más conveniente, en principio, calentar el matraz con una pequeña corona de gas, que aplicar directamente el calor á su fondo. No hay que decir que, si la tierra que debe analizarse es calcárea, debe verterse al principio el ácido con mucha precaución.

Cuando el líquido se ha enfriado, se diluye con agua; se añade después, según consejo de Maquenne, hipofósfito sódico, á fin de destruir los compuestos amoniomercúricos que se han formado en la reacción y que no desprenderían en estado de amoníaco, en contacto

con la sosa que se añade después, todo el nitrógeno que contienen. La adición del hipofosfito produce casi inmediatamente en todo el líquido una emulsión negra debida á la difusión del mercurio metálico coloide. Basta calentar durante media hora en baño maría para que este mercurio se reúna. Se decanta el líquido en un matraz de á litro, se lava muchas veces y se añade sosa cáustica al líquido decantado. Se hierve, después de haber enlazado el matraz con un refrigerante de Schlœsing, y se recibe el amoníaco en un ácido valorado. Los resultados obtenidos son excelentes. Este método vale tanto como el de la cal sodada en cuanto á su exactitud; tiene la ventaja de ser mucho más rápido, menos costoso y de más fácil ejecución. Cuando se quieren obtener resultados muy exactos, es indispensable destilar *en blanco* un peso de ácido sulfúrico y de sosa, igual al que ha servido en el ensayo: estos reactivos, *aun los considerados como puros,* dan siempre algo de amoníaco.

Relativamente á la presencia de nitratos en la tierra, haremos aquí las mismas observaciones que hicimos antes sobre el método de la cal sodada. El ácido nítrico es parcialmente expulsado en el procedimiento de Kjeldahl y parcialmente reducido. Se ha modificado el método de Kjeldahl, como se ha modificado el de la cal sodada, á fin de obtener al mismo tiempo el nitrógeno nítrico. Para ello, se añade á la mezla de ácido sulfúrico y anhídrido fosfórico, ya algunos gramos de ácido benzoico, ya más bien algo de ácido fenolsulfúrico y algunos granos de polvo de zinc. El nitrógeno de los fenoles nitrados que se forman en la reacción es reducido por el zinc al estado amónico. Esta modificación, importante en los análisis de los abonos complejos nitrogenados que pueden contener nitratos, no ofrece ventajas sobre el método más sencillo que hemos descrito, cuando se trata únicamente de tierras de labor. Los reductores propuestos para transformar el nitrógeno nítrico en nitrógeno amónico son, por otra parte, numerosos.

β. **Nitrógeno nítrico.**—La determinación del nitrógeno nítrico puede parecer superflua: en efecto, si se supone que el suelo que se va á examinar es capaz de nitrificar, existen grandes variaciones en las proporciones del ácido nítrico que contiene, según las estaciones, el grado de sequedad ó de humedad de la tierra, la presencia ó la ausencia de vegetales y la edad de éstos. Sin embargo, una determinación del nitrógeno nítrico nunca es inútil; se puede convencerse así de la presencia de esta forma del nitrógeno, eminentemente utilizable por la mayoría de las plantas del gran cultivo. El procedimiento más sencillo y el mejor, según nuestra opinión, es el de Schlœsing.

No siendo el nitrógeno nítrico retenido por el poder absorbente, basta tratar un peso conocido de tierra (100 á 1000 gramos, según la cantidad presumida de nitratos) con agua destilada adicionada de una pequeña cantidad de cloruro cálcico puro, á fin de que el líquido que escurra quede límpido. Este lavado puede efectuarse en un embudo provisto de un filtro sin pliegues, ó mejor en un embudo de Büchner, cuyo fondo, provisto de pequeños agujeros, está cubierto de un disco de papel de filtro. Se evapora luego el líquido de loción en baño maría después de haberle añadido algunas gotas de potasa. Cuando la masa se ha reducido á una decena de centímetros cúbicos, se filtra; se lava el filtro con un poco de agua y se evapora en una pequeña cápsula hasta que el líquido tenga un volumen de 4 á 5 centímetros cúbicos. Se hace actuar sobre este líquido, en caliente, una mezcla de cloruro ferroso y de ácido clorhídrico, con las precauciones sabidas, y se recoge sobre mercurio el óxido nítrico que se desprende según la reacción:

$$NO^3K + 3FeCl^2 + 4HCl = NO + 3FeCl^3 + KCl + 2H^2O$$

Se lee el volumen del gas; de este volumen corregido se deduce la cantidad de ácido nítrico contenido en el peso de la tierra ensayada.

γ. **Nitrógeno amónico**.—Esta forma del nitrógeno es más difícil de conocer exactamente. La determinación correcta de este álcali ofrecería algún interés, porque está demostrado que las plantas utilizan muy bien el nitrógeno amónico y porque es posible que, en las condiciones ordinarias, la planta tome del suelo á la vez nitrógeno nítrico y nitrógeno amónico.

Se puede afirmar que, casi siempre, una tierra normal no contiene más que indicios de nitrógeno amónico. En efecto, según veremos en el estudio de la nitrificación, la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno nítrico admite, como estadio intermedio, la producción de amoníaco: pero, éste sólo tiene una existencia corta: y, cuando las condiciones de la nitrificación se encuentran realizadas, su transformación en ácido nítrico es rápida. En algunas circunstancias, sin duda, el amoníaco puede aparecer en la tierra en cantidades que se pueden calificar de anormales. La aplicación de un exceso de una sal amónica en una estación en que la nitrificación está suspendida, como á últimos de otoño ó en

invierno; la sumersión de un suelo á causa de lluvias abundantes ó de inundación, que favorecen los fenómenos de reducción de los nitratos; la adición de enmiendas calcáreas, principalmente de cal viva, son otras tantas causas que mantienen ó provocan la presencia del amoníaco en el suelo. Pero, si semejantes condiciones á veces se realizan, en general son efímeras.

La dificultad de la determinación del amoníaco procede de que este álcali es fijado por el poder absorbente y es necesario destruir este poder para poner en libertad á la base. Hemos visto (pág. 289) que los reactivos ácidos ó alcalinos (ácidos ó bases diluídas) descomponen la materia orgánica poniendo el amoníaco en libertad: éste pasa al estado de sal si el reactivo empleado para destruir el poder absorbente es un ácido: se desprende en estado libre si la tierra se pone en contacto con una base fuerte, aun diluída. De manera que, *es el reactivo quien engendra, si no la totalidad del amoníaco, á lo menos una buena parte de esta base* y, esto, en una proporción que es imposible apreciar.

Schlœsing ha propuesto destruir el poder absorbente por el empleo del ácido clorhídrico diluído y frío hasta descomposición de los carbonatos y aparición de una reacción francamente ácida. Después este líquido ácido, decantado con ciertas precauciones, que sería prolijo explicar aquí, se destila con magnesia recientemente calcinada. Es evidente que deben emplearse el agua y los reactivos exentos de amoníaco. De todos modos, aunque el contacto del ácido con la tierra sólo dure poco tiempo, es probable que, en algunas muestras ricas en humus, la acción del ácido se haga sentir produciendo cierta cantidad de amoníaco.

Aconsejamos, pero con algunas salvedades, sin embargo, acudir al siguiente procedimiento que no afecta á las amidas y mediante el cual sólo se desprende el nitrógeno amónico. Longi (1886) ha demostrado que, si se calienta á 40° durante cuatro horas en el vacío, en presencia de cierto volumen de agua y de magnesia calcinada, una mezcla de amidas bien definidas (urea, oxamida, etc.) y una sal amónica cuyo peso se conoce, se desprende una cantidad de amoníaco que corresponde exactamente á la que contiene la sal amónica, no más: las amidas quedan inalteradas. Si se supone que las amidas del suelo se comportan, en este concepto, como amidas bien definidas, se puede emplear este procedimiento con la tierra de labor.

Se introducirán, pues, en un matraz de á litro, algo resistente,

un centenar de gramos de tierra, 3 ó 4 gramos de magnesia y 250 centímetros cúbicos de agua. El tapón de caucho que cierra el matraz tendrá dos agujeros: El primero atravesado por un tubo muy estrecho para que deje pasar un pequeño volumen de aire destinado á evitar las sacudidas; el segundo atravesado por un tubo de vidrio encorvado que estará en comunicación con un tubo de bolas de Will y Warrentrapp que contenga un ácido diluído. Se hace el vacío por la extremidad del tubo de bolas, y se calienta el matraz á unos 40°. Al cabo de cuatro horas, la reacción ha terminado. No falta más que pasar el líquido ácido á un matraz, alcalinizarlo con magnesia, destilar y recoger en un ácido valorado el amoníaco que se desprende. El valor de este ácido deberá ser conocido, pero deberá ser muy bajo, porque la proporción de amoníaco así obtenida es siempre muy pequeña.

Tales son, sumariamente expuestos, los principales métodos analíticos que permiten determinar los elementos del suelo que se eliminan por calcinación, *agua, carbono, nitrógeno*. La determinación de estos elementos es indispensable en el caso de un análisis completo, y las cifras obtenidas son susceptibles de una interpretación muy precisa; con la condición, como hemos dicho ya, de añadir á ellas la determinación del calcáreo. Esta última substancia es la sola capaz de reaccionar, según la cantidad que el suelo contenga de ella, en un sentido favorable: 1.°, sobre el carbono del humus, con el que se combina formando un cemento susceptible de aglomerar las partículas arenosas; 2.°, sobre el nitrógeno orgánico, para cuya nitrificación no puede faltar su presencia.

V

DETERMINACIÓN DE LA TOTALIDAD DE LOS ELEMENTOS MINERALES

Es siempre útil conocer *la totalidad de los elementos minerales* que contiene una tierra dada. Este análisis se efectuará como si se tratase del análisis de una roca. Después de calcinar la tierra, se porfiriza y se trata un peso conocido por el ácido fluorhídrico adicionado de algo de ácido sulfúrico, ó por una mezcla de fluoruro amónico y ácido sulfúrico. La reacción debe efectuarse en una cápsula de platino.

Este tratamiento tiene por efecto, como se sabe, eliminar la sílice en forma de fluoruro de silicio gaseoso y convertir todas las bases en

sulfatos. Mediante procedimientos conocidos se separarán las bases pesadas y térreas tratando primero la mezcla de sulfatos por el nitrato bárico en exceso que elimina el ácido sulfúrico, y luego, después de filtración, por amoníaco y carbonato amónico que, á la ebullición, precipitan todas las bases térreas (así como una parte de la magnesia); la sosa y la potasa quedan en disolución. Cuando se ha evaporado á sequedad el líquido filtrado, se somete á la acción del agua regia á fin de destruir las sales amónicas; se evapora nuevamente á sequedad y se añade al residuo un poco de ácido oxálico. Se calcina ligeramente y así se insolubiliza la magnesia. No quedan más que la potasa y la sosa, que se separan por los métodos ordinarios. El tratamiento fluorhídrico tiene, pues, por objeto, *la determinación total de la potasa y de la sosa, es decir, de los álcalis.*

Para determinar los demás elementos del suelo, se pesa una cantidad conocida de tierra calcinada y porfirizada y se mezcla íntimamente en un crisol de platino con 3 ó 4 veces su peso de carbonato sódico seco (ó una mezcla de partes iguales de carbonato sódico y carbonato potásico) y se calienta, suavemente al principio, mientras la masa se hinche, y después más fuertemente hasta fusión completa. Se separan en seguida los diversos elementos por los métodos conocidos. Fuera de los álcalis, se puede, por este procedimiento, determinar con gran exactitud la totalidad de las substancias que tienen especial importancia respecto de la estructura del suelo ó de la nutrición vegetal: SiO^2, Al^2O^3, CaO, MgO, PO^4H^3, Fe^2O^3.

Muchos autores aconsejan, cuando se trata del análisis de las materias silicatadas (rocas, tierra de labor), el empleo del método de la *vía media* ideado por H. Saint-Claire Deville.

El lector encontrará una descripción detenida de este procedimiento en el *Traité d'analyse des matières agricoles* de Grandeau; 3.ª edición, tomo I, p. 106, París, 1897.

Como ya hemos hecho observar anteriormente, la determinación completa de los elementos minerales que una tierra contiene no nos informa de la cantidad de los materiales actualmente ó próximamente asimilables por las plantas, pero nos da una idea de las *reservas totales* que contiene el suelo y puede indicarnos, en cierta medida, la naturaleza de los abonos que requiere este suelo para tal ó cual cultivo.

Vamos ahora á describir, de una manera sucinta, los procedimientos más usados que permiten determinar en una muestra de tierra el peso de los elementos de que puede disponer la planta al cabo de más ó menos tiempo.

Al principiar este capítulo hemos expuesto cuáles eran las dificultades con que se tropieza en los estudios de este género: es necesario, en este punto, referirse á lo que hemos dicho (pág. 252) relativamente á la constitución mineral de los suelos y á la acción de ciertos reactivos respecto de la solubilización de las substancias indispensables

á la nutrición vegetal. Casi todos los métodos de análisis químico de las tierras de labor, usados en la actualidad, no son más que métodos convencionales; algunos no tienen valor más que porque las cifras que proporcionan concuerdan bastante bien con las observaciones hechas directamente respecto de los rendimientos obtenidos en un cultivo determinado en un suelo dado. Una planta toma lentamente del suelo los elementos que necesita y hace una selección entre estos diversos elementos. Pero, un análisis químico debe ser rápido; prácticamente no puede requerir muchos días. Existe, pues, una antítesis entre las dos maneras de operar: la que emplea la naturaleza y la que nosotros ponemos en acción en el laboratorio. Por esta razón es que, hasta nueva orden, *los procedimientos racionales de disolución* en los cuales se hacen actuar el agua y el ácido carbónico, en condiciones bien definidas de tiempo y de temperatura, no pueden entrar en la práctica corriente, á pesar de las ventajas indiscutibles que semejantes procedimientos presentan. Los experimentadores, y son numerosos, que emplean los ácidos enérgicos para el ataque de las tierras y determinan en seguida los principales elementos de fertilidad, se proponen solamente indicar *la cantidad de elementos fertilizantes que una muestra de tierra dada puede suministrar á las plantas durante un gran número de años.* Pero, con frecuencia los resultados de este análisis están en contradicción con los de la práctica agrícola; porque hay tierras que ceden bastante fácilmente potasa, por ejemplo, á los ácidos, y ceden poca á las plantas.

Casi siempre se emplea el ácido nítrico, puro y caliente, para el ataque de las tierras; á veces, el agua regia ó el ácido clorhídrico. Aubin y Alla han preconizado el empleo del ácido sulfúrico puro é hirviente durante tres horas. La materia orgánica es destruída en estas condiciones, la arcilla es completamente atacada y el calcáreo es transformado integralmente en sulfato cálcico. Estos autores admiten que los elementos silíceos serán poco atacados al principio y que este ataque adelantará poco después de tres horas de contacto.

Semejantes procedimientos de determinación que, generalmente, han exigido muchos estudios preliminares, nos dejan á veces en una gran incertidumbre respecto de la naturaleza de los abonos que conviene aplicar á un suelo determinado; nunca nos indican *la proporción actual de elementos asimilables.*

VI

SUBSTANCIAS MINERALES DE CARÁCTER ÁCIDO

Dejamos á un lado, en este estudio de la determinación de los elementos de carácter ácido, todo lo referente á la

sílice. Ésta es tan abundante en casi todos los suelos, y la forma bajo la cual puede entrar en el vegetal es tan mal conocida, que su estudio, en concepto analítico, es aquí superfluo.

Ácido fosfórico.—*El Comité consultivo de las Estaciones agronómicas y de los Laboratorios agrícolas* (1891) prescribió la disolución de los fosfatos del suelo por medio del siguiente procedimiento; no sin hacer observar que este método es incapaz de informar respecto del estado en que se encuentran estos fosfatos y sobre su grado de asimilabilidad.

Se ponen en una cápsula 20 gramos de tierra calcinada en la mufla. Se humedecen con agua y se les añade, por pequeñas porciones y mientras se produzca efervescencia, ácido nítrico de 36° Baumé. En seguida se añaden 20 centímetros cúbicos más de ácido, y se calienta en baño de arena durante cinco horas agitando la masa de vez en cuando y evitando su desecación. Se trata por agua caliente, se filtra, se evapora el líquido filtrado y se calienta el residuo á unos 120° para insolubilizar la sílice. Se humedece luego con agua acidulada con ácido nítrico, se filtra, se lava y se determina el ácido fosfórico precipitándolo en estado de fosfomolibdato amónico que se transforma en seguida en fosfato amónico magnésico. Este método da ciertamente casi todo el fósforo de los fosfatos, pero solamente una parte del fósforo orgánico. Puede convenir en ciertos casos é informa á lo menos *respecto de la riqueza global* de un suelo en ácido fosfórico. A menudo se admite que la riqueza media de la mayoría de los suelos en esta substancia oscila alrededor de 1 por 1000; si es menor, se acostumbra acudir al empleo de los abonos fosfatados. El método citado permite saber á qué atenerse sobre esto, pero es poco instructivo por lo que se refiere á la cantidad de ácido fosfórico disponible *actualmente* para el vegetal. Se puede decir otro tanto de todos los métodos en que se emplean ácidos fuertes, según ya hemos hecho observar anteriormente. Muchos autores, sobre todo en el extranjero, emplean el ácido clorhídrico puro de densidad 1,115, no sólo para la determinación del ácido fosfórico, sino también para la de la potasa, la cal y la magnesia. Parece que el efecto *disolvente* sobre los elementos de una tierra dada es el máximo cuando se emplea este ácido con tal concentración. A la temperatura de 100°, el ácido de densidad 1,115 conserva una composición casi constante, y su riqueza en ácido real (HCl) es de 22,9 por 100. Al cabo de cinco días de contacto á 100°, el ácido no disuelve nada más: si se prolonga el experimento, la solubilidad de los elementos disminuye (Loughridge, Hilgard).

Pasando ahora al examen de los métodos más racionales de ataque, se encuentran también, según los autores, notables divergencias en cuanto al empleo del disolvente ácido.

Fraps (1910) llama *ácido fosfórico activo* al que se disuelve de 200 gramos de tierra por una digestión de 5 horas á 40° con ácido nítrico (2000 centímetros cúbicos de ácido $\frac{N}{5}$). Según este autor, la cantidad de ácido fosfórico extraído del suelo por los cultivos está en estrecha relación con la cantidad de ácido fosfórico activo que se encuentra en el suelo. Este procedimiento no es más que una aplicación de la observación de Schlœsing hijo (pág. 254), según la cual el ácido nítrico de muy baja concentración no disuelve más que los fosfatos alcalinotérreos cuya asimilación por las plantas probablemente es muy fácil.

El método de Dyer, de que ya hemos hablado, tiene muchos partidarios á causa del principio teórico en que se funda. Recordamos que, en este método, se emplea ácido cítrico de 1 por 100. Se ponen 200 gramos de tierra en un frasco con 2000 centímetros cúbicos de agua que contiene 20 gramos de ácido cítrico; conviene añadir un exceso de ácido correspondiente al carbonato cálcico contenido en la tierra. El contacto debe durar siete días en frío, y la masa debe agitarse á menudo. Pero, á fin de que los resultados sean comparables, es indispensable seguir exactamente las indicaciones de Dyer; porque, si se disminuye la duración del contacto, ó si se cambia la concentración, no se obtienen ya las mismas cifras. Hemos señalado anteriormente las interesantes relaciones que existen entre el ácido fosfórico asimilado por las plantas y la cantidad de este ácido que pasa al líquido cítrico (pág. 256). Sin embargo, Hall y Plymen (1902) han demostrado que, si el empleo del ácido cítrico suministra generalmente buenos informes, no debe precipitarse en generalizar su adopción para todas las tierras, porque el ataque de los fosfatos por este reactivo varía con la naturaleza de las combinaciones fosfatadas que el suelo contiene. Según Hall y Amos (1906), la primera extracción no elimina todo el ácido fosfórico capaz de disolverse en el disolvente (ácido cítrico al 1 por 100, ó agua cargada de gas carbónico); la reacción es reversible, y se establece un equilibrio entre el ácido fosfórico disuelto y las bases del suelo. Engels (1912) recomienda el empleo de una solución de ácido cítrico al 2 por 100 como mejor apropiada para la determinación de los elementos nutritivos (PO^4H^3, CaO, K^2O).

El citrato amónico, en solución débil, ha sido utilizado algunas veces con el mismo objeto.

Kudaschew (1905) ha recomendado el empleo de una solución al 5 por 100 de ácido oxálico, á consecuencia de ensayos hechos con las tierras negras de Rusia, que le han demostrado que los suelos más fértiles eran aquellos que contenían mayor proporción de ácido fosfórico soluble en el ácido oxálico.

Indiquemos también una tentativa original de determinación del ácido fosfórico asimilable consistente en emplear, como disolvente, un líquido complejo que contiene sales minerales y ácidos inorgáni-

cos en la misma proporción con que se encuentran estas diversas substancias en el zumo de una planta, por ejemplo de la remolacha (Plot).

Resulta de esta breve exposición que el único método que parece, actualmente, proporcionar informes valederos respecto de la proporción de ácido fosfórico asimilable contenido en una tierra dada es el método del ácido cítrico, con las salvedades que hemos expuesto. Pero, recordemos, una vez más, que Dehérain y algunos de sus colaboradores, hace más de treinta años, habían señalado todo el partido que se podía sacar del empleo del ácido acético para definir la fracción del ácido fosfórico del suelo inmediatamente aprovechable para los vegetales (pág. 256).

Ácido sulfúrico.—El azufre es una substancia indispensable para la construcción del núcleo albuminoide; por esto es bueno saber efectuar su determinación. Hemos visto que el azufre existía en el suelo en múltiples formas (pág. 257). En la forma *orgánica*, que deriva de los tejidos vegetales aun no descompuestos, es inutilizable para la planta mientras no se presente en el estado completamente oxidado de ácido sulfúrico. La única forma útil es la forma mineral. Los sulfatos minerales (y especialmente el sulfato cálcico, que con frecuencia abunda en el suelo) son muy móviles.

La extracción hecha con un volumen conveniente de agua podría informar de un modo suficiente sobre la cantidad de ácido sulfúrico, ó más bien de sulfatos, que se encuentran en un suelo; pero, es mejor lavar un peso conocido de tierra con ácido clorhídrico del 1 por 100, en frío, en el cual el sulfato cálcico es más soluble que en el agua sola. El ácido clorhídrico puede emplearse sin inconveniente para esta extracción; no tiene propiedades oxidantes y se puede tener casi la seguridad de que los sulfatos que disuelve preexistían en el suelo en forma de tales y no proceden de la transformación de compuestos orgánicos sulfurados. Si la tierra es rica en humus, la solución clorhídrica tomará una marcada coloración parda, y no sería correcto precipitar directamente el ácido sulfúrico por una sal bárica. En este caso, la determinación del ácido sulfúrico presenta alguna inseguridad, porque, si después de haber evaporado á sequedad el líquido, se destruye en caliente la materia orgánica, ya con el ácido nítrico, ya por medio de una mezcla de carbonato sódico y nitrato potásico,

se oxida fuertemente el azufre orgánico que se encontraba en el humus; de lo cual deriva una proporción demasiado elevada de ácido sulfúrico.

VII

SUBSTANCIAS MINERALES DE CARÁCTER BÁSICO
(CaO, MgO, K^2O)

De estas tres substancias, cal, magnesia y potasa, las dos primeras son fáciles de determiuar, y el resultado es instructivo. La determinación de la potasa, desde el punto de vista especial en que nos situamos, es, por el contrario, muy incierta.

Cal.—La determinación *total* de este elemento no puede efectuarse más que usando el ácido fluorhídrico. Sin embargo, el tratamiento de la tierra por el ácido nítrico, efectuado como se ha dicho antes á propósito del ácido fosfórico, es decir, por calefacción de cinco horas en baño de arena evitando la desecación, permite obtener la totalidad de la cal que existe en la muestra en forma de carbonato, de sulfato, de fosfato, de nitrato (y de humato, si la tierra no ha sido previamente calcinada). El ataque de ciertos silicatos, fácilmente descomponibles, puede ser notable en estas condiciones.

Mediante los procedimientos conocidos, se separará la cal de los otros elementos disueltos al mismo tiempo. En cuanto á la cantidad de materia que debe emplearse en el análisis, varía de 2 á 40 gramos según los suelos. Pero, es preciso recordar que la *forma* de la cal más útil es la de *carbonato;* es superfluo insistir en los papeles físico y químico que esta materia desempeña en el suelo. Resulta de ello que conviene, generalmente, cuando se trata de la cal, no determinar en una muestra de tierra dada más que el carbonato cálcico. Sin embargo, bueno es observar que muchos silicatos que contienen cal, que los ácidos diluídos descomponen con facilidad, ceden esta base á muchos vegetales. La mayoría de las tierras llamadas *fuertes* contienen la mayor parte de su cal en forma de silicatos.

Cuando se trata de determinar el calcáreo solo, se deben

hacer ciertas diferencias. *El calcáreo verdaderamente activo es el calcáreo fino.* No hay que contentarse con determinar el calcáreo total. Es necesario buscar cuál es la fracción de esta substancia que presenta un estado de división bastante grande para ser fácilmente disuelta por el gas carbónico y entrar en juego en las reacciones químicas que modifican tan acertadamente las propiedades físicas del suelo respecto de la permeabilidad, si se trata de un suelo compacto, ó respecto de la neutralización de las substancias húmicas si el suelo es ácido.

La evaluación *aproximada* del calcáreo *total* puede hacerse mediante un ácido diluído (ácido clorhídrico al $^1/_{10}$, por ejemplo) empleado en frío. Se cuidará de agitar frecuentemente la mezcla. La cifra así obtenida, que da la cantidad de cal disuelta, por lo general será demasiado elevada porque comprende la cal del carbonato, la del fosfato, la del sulfato y la del humato. Pero, en los casos en que no se requiere gran precisión, esta determinación basta si, de todos modos, la cantidad de cal en forma de carbonato es preponderante, como ocurre en los suelos que sean ya algo calcáreos. Es cierto que si el calcáreo entra en la proporción del 5 por 100 en una tierra, el peso de la cal combinada en el humato, el fosfato y el sulfato, es generalmente muy pequeño con relación al que está combinado con el ácido carbónico. Se podría, por otra parte, restar del peso de la cal total el peso de la cal unida á otros ácidos.

La determinación del *ácido carbónico total,* efectuada como hemos dicho en la página 356, puede servir para la determinación del calcáreo de un modo aproximado. Sólo la presencia del carbonato magnésico podría viciar el análisis; por lo demás, sería fácil restar del peso del gas carbónico total la fracción combinada con la magnesia, haciendo una determinación de esta base. El carbonato magnésico generalmente está en escasa cantidad respecto del carbonato cálcico; no se incurre, pues, en un error muy grosero refiriendo al calcio sólo la totalidad del gas carbónico obtenido en la determinación. Además, desde el punto de vista de las reacciones que ejerce en el suelo, el carbonato magnésico desempeña el mismo papel que el carbonato cálcico.

Se puede también determinar el gas carbónico del calcáreo haciendo actuar un ácido sobre un peso de tierra determinado

y recogiendo los gases sobre mercurio. Mediante una disposición bien conocida, se hace primero, con una trompa de mercurio, el vacío en el matraz que contiene la tierra, se introduce luego cierta cantidad de ácido clorhídrico y, haciendo funcionar la trompa y facilitando la operación mediante el calor, se extrae la totalidad del gas desprendido.

Se determina frecuentemente el calcáreo, ó los carbonatos totales contenidos en una muestra dada, mediante el *calcímetro de Bernard*. Mediante este aparato, se hace pasar á un tubo graduado el gas carbónico que se desprende de un peso conocido de tierra tratado en frío por el ácido clorhídrico. Una operación efectuada con un peso conocido de carbonato cálcico puro permite graduar el aparato. Las indicaciones que suministra este procedimiento son satisfactorias (1).

Calcáreo activo. —Pero, generalmente, es mucho más importante no determinar en la tierra más que el *calcáreo activo*, es decir, el calcáreo diseminado en granos muy finos. Se puede efectuar esta determinación mediante el procedimiento de P. de Mondésir, especialmente recomendable por la simplicidad de las manipulaciones. Este procedimiento se aplica á las tierras poco calcáreas que se cree deben ser encaladas ó margadas con provecho.

P. de Mondésir ataca la tierra por un ácido poco enérgico (ácido tartárico diluído), durante un tiempo bastante corto, de manera que, sólo el calcáreo muy fino, y la superficie de los granos mayores, entran en solución. El volumen del gas carbónico que se desprende es medido por su tensión. Se encontrará en la obra de Grandeau (*Traité d'analyse des matières agricoles*, tomo I, págs. 185 y siguientes, París, 1897) la descripción del frasco (de una capacidad de 500-600 centímetros cúbicos) en que se efectúa la reacción. El gas carbónico, que se produce por el contacto del ácido tartárico diluído con el carbonato cálcico, ejerce una presión sobre una pequeña bolsa de caucho llena de agua, que comunica con un tubo de vidrio que sirve de manómetro. Se gradúa el aparato por medio de una serie de operaciones preliminares que consisten en hacer diversos ensayos con pesos conocidos de carbonato cálcico puro en presencia de la misma cantidad de líquido y de un exceso de ácido tartárico. Se lee en el manómetro la altura á que llega el agua.

También se ha propuesto determinar el calcáreo haciendo digerir un peso conocido de tierra durante tres horas en baño maría con una solución al 10 por 100 de cloruro amónico. Se filtra al cabo de

(1) Los aparatos empleados para determinar rápidamente la proporción aproximada de carbonato cálcico contenido en una tierra, partiendo del volumen del gas carbónico desprendido al tratar la tierra por un ácido enérgico ó la presión del gas formado, son muy numerosos y hasta se pueden improvisar con pocos medios.—C. B.

este tiempo, y se determina en el líquido filtrado la cantidad de cloruro cálcico que se ha formado por doble descomposición: se deduce de él el peso del calcáreo que ha entrado en reacción.

Sin embargo, en este procedimiento, la cal del sulfato, y una parte de la que contienen algunos silicatos, fácilmente descomponibles, entran también en disolución.

Es necesario observar, para terminar, que no existen relaciones entre la riqueza de un suelo, en gas carbónico desprendible por la acción de los ácidos, su riqueza en cal y la cantidad de esta base que pueden tomar los vegetales. Cuando el ataque con los ácidos indica la presencia de una notable cantidad de gas carbónico, se puede, en general, afirmar que el suelo contiene una notable proporción de cal; pero, cuando no se obtiene más que un escaso desprendimiento gaseoso, no puede deducirse de ello que este suelo contiene poca cal.

Magnesia.—La determinación de esta substancia se hace como la de la cal, atacando la tierra por un ácido diluído. Se puede admitir que, con un contacto suficientemente prolongado, el carbonato magnésico se disuelve en estas condiciones. No existe procedimiento que permita determinar la magnesia *activa.*

Si se tratase la magnesia por el ácido nítrico puro en caliente, se correría el peligro de disolver una notable cantidad de magnesia combinada con la sílice, como ocurre con los micasquistos. La magnesia tiene considerable importancia respecto de la nutrición de la planta: sabido es que se concentra de preferencia en las semillas donde su presencia es constante y su peso, casi siempre, es superior al de la cal.

Como la magnesia se halla generalmente en pequeña cantidad en la mayor parte de los suelos, es necesario tomar un peso de tierra algo grande para efectuar la determinación de esta base, y conviene observar que la determinación de la magnesia, en presencia de mucha cal, presenta algunas dificultades.

Potasa.—La potasa es el elemento más difícil de determinar en su forma asimilable: los datos que se tienen sobre este punto son poco precisos. Esta base, generalmente, es bastante abundante en el suelo. Las tierras silíceas, que proceden de la descomposición de las rocas primitivas, contienen con frecuencia de 5 á 15 por 100. Á menos de tratar la muestra de tierra por el ácido fluorhídrico, que es el único agente que solubiliza la totalidad de la potasa, volatilizando

la sílice en estado de fluoruro de silicio, no existen reactivos ácidos que sean capaces de disolverla completamente. La cantidad de potasa que entra en disolución, cuando se emplean ácidos fuertes, depende de la concentración del ácido, de la duración de la reacción y de la elevación de la temperatura. Hemos expuesto anteriormente (pág. 258) las incertidumbres inevitables que presenta, en el presente caso, el empleo de los ácidos en general. Esta crítica se dirige, por consiguiente, al procedimiento oficial francés, según el cual el ataque de la tierra debe hacerse mediante el ácido nítrico caliente, durante un tiempo de cinco horas.

Entre los procedimientos de determinación más recomendables, que parecen aproximarse algo á las condiciones naturales en que este álcali se solubiliza, deben citarse los siguientes:

Dyer ha aplicado á esta determinación el método del ácido cítrico que le había dado buenos resultados respecto del ácido fosfórico (pág. 369). Parece que se pueden interpretar las cifras obtenidas en el mismo sentido: la potasa, que disuelve el ácido cítrico en una muestra de tierra, estaría en una forma inmediatamente disponible para la planta.

Con el objeto de disolver la potasa asimilable retenida en las partículas térreas por el poder absorbente, Schlœsing ha propuesto tratar un peso de 100 gramos de tierra, mezclado con 600 á 800 centímetros cúbicos de agua, con pequeñas cantidades de ácido nítrico, hasta que cese la efervescencia, es decir, hasta la destrucción del calcáreo. Se deja digerir durante seis horas en frío, después de haber añadido 5 gramos del mismo ácido. Es evidente que este procedimiento, menos brutal que el consistente en hacer un tratamiento en caliente, en presencia de un exceso de un ácido enérgico, solubiliza una cantidad de álcali muy inferior á la que se obtiene en este último caso. Pero, subsiste siempre alguna duda sobre la *naturaleza de la potasa así puesta en libertad*, cuya totalidad no parece que forzosamente deba ser inmediatamente asimilable.

Hemos señalado ya antes (pág. 241) los resultados que se obtienen tratando la tierra por el agua cargada de gas carbónico. La cantidad de potasa disuelta en estas condiciones es siempre superior á la que suministra el agua pura: lo que puede explicarse, admitiendo que el ácido carbónico actúa como un ácido débil, que descompone particularmente los silicatos zeolíticos y destruye las combinaciones de absorción que la potasa ha formado, ya sea con estos silicatos, ya con la materia orgánica. Este tratamiento de las tierras

respecto de su análisis parece, *a priori,* muy racional y luego veremos lo que de él puede esperarse.

Muchos experimentadores han tratado, en diferentes ocasiones, de definir la cantidad de potasa asimilable empleando el agua carbónica. He aquí, para no citar más que un ejemplo reciente apoyado en ensayos de cultivos, cómo propone operar Bieler-Chatelan (1910). Se trata una muestra de tierra dada: 1.°, por el ácido clorhídrico concentrado y frío con cuarenta y ocho horas de contacto; 2.°, por el agua saturada de gas carbónico á la temperatura y á la presión ordinarias, ya sea *por agitación* (30 gramos de tierra adicionados de 500 centímetros cúbicos de agua carbónica, que se agitan durante diez horas), ya por *desalojamiento ó lixiviación continua:* 100 gramos de tierra se ponen en una alargadera vertical y se vierte encima agua carbónica por pequeñas porciones hasta obtener un volumen de líquido límpido proporcional á la cantidad de agua caída durante el período de vegetación anual en Lausanne, localidad donde han sido hechos estos ensayos. Se determina, mediante los procedimientos conocidos, la potasa en estas diversas soluciones.

Por otra parte, los resultados suministrados por estos análisis se comparan con las cifras que expresan la influencia del abono potásico sobre los rendimientos en forrajes secos por hectárea. Las conclusiones á que ha llegado Bieler-Chatelan son las siguientes: No hay proporcionalidad (como debía esperarse) entre las proporciones de potasa soluble en el ácido clorhídrico y las cifras que expresan el efecto del abono potásico. Así, una tierra en la que este abono ha producido una acción manifiesta se encuentra más rica en potasa soluble en el ácido clorhídrico que otra tierra en que el efecto del abono ha sido negativo. Por el contrario, *cuanto más aumenta la proporción de potasa soluble en el agua carbónica, menos apreciable es el efecto del abono potásico.* Resulta de esto que el tratamiento de las tierras por el agua carbónica da una medida de la potasa asimilable de un suelo que responde á los ensayos de cultivo.

Las tierras más ó menos calcáreas ceden, proporcionalmente, algo menos de potasa al agua carbónica que las tierras no calcáreas.

Análisis racional de las tierras mediante el agua cargada de gas carbónico.—Es inútil insistir nuevamente en las ventajas que presenta el empleo del agua carbónica desde el punto de vista de la apreciación exacta de los elementos de fertilidad actualmente asimilables por la planta.

Muy superior á los procedimientos en que se trata una muestra de tierra por reactivos enérgicos, completamente extraños al suelo, el método que consiste en emplear el agua carbónica no está, sin embargo, al abrigo de toda censura.

Si se quieren obtener resultados comparables, es necesario emplear un agua carbónica de riqueza conocida y que actúe á una determinada temperatura. Mientras que en el laboratorio es fácil obtener estos dos factores constantes, en la naturaleza ambos son esencialmente variables. En la operación analítica se acelera visiblemente el fenómeno de la disolución, puesto que la mayor parte de las veces se agita la muestra de tierra con el reactivo: todas las partículas térreas se ponen, pues, en contacto, en un momento dado, con el disolvente. Estos contactos son menos íntimos en el suelo y, siendo iguales las demás circunstancias, las disoluciones se efectuarán en un tiempo mucho más largo. No puede pensarse en emplear agua *saturada* de gas carbónico, si no se opera en vasijas cerradas: porque durante las decantaciones la solución siempre pierde gas.

Sea lo que fuere, este método que á menudo ha sido puesto en práctica, más bien como término de comparación que como procedimiento de análisis propiamente dicho, según nuestro parecer merece fijar seriamente la atención. Es susceptible de entrar en la práctica corriente con la condición de precisar bien sus pormenores. Sólo mencionaremos, respecto de este punto especial, el método operatorio de König y, sobre todo, el mucho mejor estudiado de Mitscherlich.

König opera del siguiente modo. Se ponen en contacto 1500 gramos de tierra desecada al aire, con 6000 centímetros cúbicos de agua saturada al cuarto de gas carbónico. El frasco en que se efectúa la reacción debe estar bien cerrado: se agita con regularidad durante tres días. Se decantan mediante un sifón, al cabo de este tiempo, 4000 centímetros cúbicos de este líquido límpido (correspondientes á 1000 gramos de tierra); se deja en reposo durante veinticuatro horas y se filtra en un embudo tapado. Si el líquido no es límpido, se evapora á $\frac{1}{10}$ de su volumen inicial, se filtra para separar la arcilla y se completa con las aguas de loción hasta formar 500 centímetros cúbicos. En ciertas tierras es conveniente repetir muchas veces el tratamiento. Luego se determinan las substancias disueltas por medio de los procedimientos ordinarios.

E. A. Mitscherlich, ha publicado, en 1907, un trabajo de conjunto sobre este mismo asunto. Este autor aplica el procedimiento

del ácido carbónico al análisis de tierras de composición variada, y estudia de una manera sistemática la influencia de los diversos factores en el ensayo. Vamos á indicar muy brevemente algunos de los puntos esenciales de este trabajo, rogando al lector que vea la memoria original, respecto de los pormenores relativos á las cifras obtenidas y á las correcciones que deben hacerse por los métodos analíticos empleados (*Landw. Jahrbücher*, t. XXXVI, p. 309; 1907).

La solubilidad de los elementos del suelo es función de la cantidad de agua que contiene; cuanto más abundante es la lluvia, mayores son las facilidades de la disolución. La temperatura juega también un papel importante. Además, como se opera en presencia de un exceso de gas carbónico, interviene la acción de la masa, de manera que este gas puede expulsar de sus combinaciones á indicios de ácidos enérgicos, por ejemplo, el ácido fosfórico. Es, pues, indispensable, si se quieren obtener resultados comparables con las diversas muestras de tierra que se deseen analizar, mantener constantes los cuatro factores: duración del contacto, temperatura, cantidad del gas carbónico, cantidad de agua empleada.

Con este objeto, Mitscherlich pone la muestra de tierra en un frasco de 2500 centímetros cúbicos que contiene 2000 centímetros cúbicos de agua y un poco de cloroformo para evitar toda fermentación. El frasco se pone dentro de un termostato calentado á 30° y su contenido se agita continuamente con un agitador de plata. El autor emplea una duración de la acción de once horas y media. A través de la masa burbujea con regularidad una corriente de gas carbónico. El peso de tierra empleado varía de 80 á 200 gramos (tierra desecada al aire, referida á la tierra desecada en la estufa). Terminado el ensayo, se saca el líquido directamente mediante un sifón formado por un tubo de tierra porosa.

En fracciones bien determinadas del líquido decantado, se determina el nitrógeno por el método de Kjeldahl, el ácido fosfórico por el método del fosfomolibdato, la cal y la potasa por los procedimientos ordinarios. Todos los reactivos son cuidadosamente comprobados respecto de su pureza, y por medio de numerosos ensayos se ha fijado el grado de precisión que se podrá alcanzar en cada determinación en particular.

He aquí algunas observaciones relativas á la influencia de los cuatro factores citados en la marcha de la operación. La relación del peso de tierra empleada en el análisis respecto del peso del agua varía de $\frac{1}{25}$ á $\frac{1}{10}$ según que el peso de la tierra sea de 80 ó de 200 gramos (siendo el peso del agua de 2000 gramos); pues bien, *en las condiciones naturales*, una parte de tierra se encuentra en contacto con la mitad de su peso de agua como máximo. Después de diez horas de agitación, como se ha dicho antes, se obtiene un peso casi constante de materia disuelta. En realidad, la concentración debería aumentar sin cesar hasta que el líquido estuviese saturado:

no se trata aquí de este caso. Se trata, pues, de soluciones en las cuales apenas se perciben, al cabo de cierto tiempo, cambios de concentración porque la duración del contacto del agua con la tierra no puede prácticamente prolongarse más allá de ciertos límites. La potasa, la cal y el ácido fosfórico se disuelven en cantidades tanto mayores cuanto mayor es la riqueza del líquido en gas carbónico. Pero, esto no parece ser siempre verdad para el nitrógeno.

Cuando se trata de un suelo rico en humus, siendo iguales las condiciones, la temperatura no influye sensiblemente en la solubilidad de la cal y del ácido fosfórico; el máximo de solubilidad de estas dos substancias se encuentra cerca de 18°. En cuanto á la solubilidad de la potasa, es proporcional á la temperatura; la del nitrógeno aumenta mucho más allá de 18°.

Por lo que toca á la influencia de la cantidad de agua, el autor ha operado con las concentraciones siguientes: $\frac{\text{Suelo}}{\text{Agua}} = \frac{1}{5}, \frac{1}{10}, \frac{1}{15}, \frac{1}{20}, \frac{1}{25}, \frac{1}{30}$, y han encontrado que, cuando la cantidad de agua aumenta, la cantidad de las sales disueltas también aumenta (suponiendo constantes los demás factores: T = 30°; agua saturada de gas carbónico; duración once horas y media). Los experimentos de Mitscherlich fijan de una manera muy precisa las condiciones de éxito de una operación y demuestran todas las ventajas de un procedimiento que realiza, lo mejor posible, el mecanismo natural de formación de las soluciones nutritivas.

A fin de dar una idea del valor de las cifras obtenidas en estos ensayos, tomemos la media de uno de los experimentos del autor citado relativo á una tierra de jardín rica en humus. 100 gramos de esta tierra, adicionados de diez veces su peso de agua, fueron agitados, durante once horas y media, en el seno de una corriente de gas carbónico, á una temperatura de 30°. La cantidad de los elementos disueltos fué la siguiente:

$K = 0,0107$ gr. ($K^2O = 0,0128$ gr.); $Ca = 0,1441$ gr. ($CaO = 0,2017$ gr.); $P^2O^5 = 0,0093$ gr.

Busquemos, partiendo de estas cifras, cuál sería la riqueza en elementos fertilizantes de la masa de tierra contenida en una hectárea, suponiendo que la capa del suelo tenga un espesor de 40 centímetros y pese 4000 toneladas. Encontraremos:

$K^2O = 512$ kilogramos; $CaO = 8068$ kilogramos; $P^2O^5 = 372$ kilogramos.

Si los vegetales, aun los más exigentes del gran cultivo, encontrasen en un suelo tales cantidades de elementos nutritivos *en estado soluble*, no habría motivo para la aplicación de abonos. Este método

de análisis con el ácido carbónico da, pues, generalmente, resultados todavía demasiado elevados, pero, sin embargo, infinitamente más aproximados á la realidad que los que se obtienen por todos los demás procedimientos. Se comprende, sin que sea necesario insistir en ello, que, en el método de Mitscherlich, la relación entre el peso del agua y el de la tierra es mucho más elevada que en las condiciones naturales; por otra parte, esta agua está siempre saturada de gas carbónico, mientras que, en general, esta saturación nunca se alcanza normalmente.

Se deduce de esto inmediatamente que, en todo suelo cuya proporción de humedad pudiese mantenerse constante, que contuviese una elevada proporción de humus y en el cual un grado conveniente de aereación facilitase las combustiones, los fenómenos de disolución serían muy activos. Este suelo podría, pues, subvenir á las necesidades de cosechas muy exigentes, aun cuando su riqueza en elementos fertilizantes totales fuese muy mediana.

VIII

INTERPRETACIÓN DE LOS ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO DE LOS SUELOS

Cualquiera que sea el procedimiento empleado para efectuar el análisis físico ó el análisis químico de un suelo, nos encontramos finalmente en presencia de ciertas cifras que se trata de interpretar. Estas cifras deben darnos informes precisos sobre los puntos siguientes: cuál es el grado de compacidad ó de permeabilidad de la tierra examinada; cuáles so las mejoras que debemos hacer en ella para disminuir su compacidad y aumentar la permeabilidad, ó recíprocamente; cuáles son las probabilidades de éxito con que podemos contar. He aquí las aclaraciones que tenemos el derecho de exigir de un análisis físico. El análisis químico, por otra parte, debe indicarnos, no sólo la *cantidad total* de los elementos de fertilidad que la planta puede encontrar en el cubo de tierra que ella explora, sino sobre todo *el grado de asimilabilidad* de estos elementos, es decir, la fracción actualmente utilizable para una cosecha dada. Es preciso poderse dar cuenta, consultando las cifras de un análisis químico, de si es útil ó no

aplicar materias fertilizantes suplementarias al suelo, y cuál es la cantidad de estas materias que debe aplicarse para un determinado cultivo. El análisis físico nos dirá *en qué forma* es preferible incorporar al suelo la substancia que falta, porque este análisis habrá hecho conocer el grado de permeabilidad del suelo considerado y, por consiguiente, su grado de aereación, así como la facultad que posee de retener una proporción mayor ó menor de humedad. Muchos abonos no se vuelven asimilables (abonos nitrogenados complejos, por ejemplo) más que cuando han sufrido una descomposición profunda para la cual es indispensable la presencia de una elevada proporción de oxígeno.

Dificultades de las interpretaciones analíticas.—Si la interpretación de los análisis físico y químico pudiese formularse siempre de una manera bien categórica, prestaría inmensos servicios á la agricultura, y el problema del mejoramiento de muchos suelos quedaría entonces resuelto. Desgraciadamente, raras veces ocurre esto, y es necesario hacer muchas salvedades, sobre todo cuando se trata de las cifras que el análisis químico proporciona: estas salvedades se imponen á causa de las consideraciones que hemos expuesto en el presente capítulo.

Á falta de métodos analíticos capaces de darnos informes precisos relativamente al grado de verdadera fertilidad de una tierra, parecería que la *experimentación directa en el suelo* debe ser el único modo racional de proceder: en una tierra dada no se debería cultivar más que la planta que en ella mejor se desarrolla y se evaluarían sus exigencias por el análisis de sus cenizas. Se substituiría así con el análisis de la planta el análisis del suelo. Sin embargo, las numerosas investigaciones hechas en este sentido demuestran que la misma planta nunca tiene en todos los sitios —y aun en un sitio determinado—una composición mineral uniforme. Esta composición varía esencialmente con la composición del suelo en que vive, indicando, por ejemplo, un exceso de cal, de potasa ó de nitrógeno, que el suelo es más rico en cal, en potasa ó en nitrógeno. Además—y esto es capital,—*la cuestión del clima* desempeña un papel preponderante respecto de la composición mineral de los vegetales. En un clima, esto es, bajo determinadas influencias exteriores de luz, humedad y temperatura, el análisis de una planta nos dará cifras que ofrece-

rán notables diferencias con las que el mismo análisis daría para la misma planta desarrollada en otro clima.

La cantidad de agua que recibe el suelo varía de un año á otro en extensos límites, no sólo en los diferentes puntos del globo donde crece la misma planta, sino también en el mismo punto; este factor esencial en los fenómenos de disolución de los elementos minerales determina una inevitable repercusión en la lentitud ó en la rapidez del desarrollo de la planta y, por lo tanto, en su riqueza en substancias fijas y en nitrógeno. Esto es lo que resulta, en particular, de los experimentos de Wilms y von Seelhorst (1899) relativos á las oscilaciones que presenta la composición de los cereales (grano y paja) bajo la influencia de abonos aplicados en presencia de cantidades de agua variables. El régimen de las aguas ocasiona, respecto del peso de la materia seca de estas plantas, tales perturbaciones que no se puede sacar del análisis de las cenizas ninguna conclusión valedera sobre la riqueza del suelo en elementos fertilizantes.

La composición de una planta determinada no es, pues, nunca uniforme. Si el análisis del suelo por la planta es á veces capaz de informarnos sobre la composición del suelo que la nutre, es preciso tener muy en cuenta, además, las influencias exteriores.

A pesar de sus imperfecciones, la experimentación directa en el suelo ofrece numerosas ventajas, é indicaremos, al terminar este capítulo, lo que conviene hacer en este punto.

Formuladas estas reservas, nos proponemos ahora enseñar con pocas palabras los preciosos informes que puede proporcionar la interpretación prudente de las cifras proporcionadas por los análisis físico y químico de una tierra. Pero, si se quiere que estos datos tengan valor, es indispensable observar las adjuntas reglas que se refieren á la toma de muestra de la tierra y que no son más que la repetición abreviada de las que indicamos á propósito del análisis físico de los suelos (pág. 196).

Toma de muestras.—Las muestras de una tierra deberán ser tomadas con el mayor cuidado, y de tantos puntos como sea necesario si la homogeneidad de la tierra parece dudosa. Se buscará la profundidad del suelo propiamente dicho, á fin de conocer el cubo de tierra de que pueden disponer las raíces.

Los análisis físico y químico no se efectúan más que con la tierra fina (generalmente la que pasa por el tamiz de 1 milímetro), siendo indispensable calcular *la relación de esta tierra con la tierra total.* En efecto, en el caso en que la tierra fina no formase, por ejemplo, más que la mitad de la tierra total, se estaría expuesto, de no hacer

la corrección, á atribuir á la tierra total una riqueza que en realidad no tendría. Este es un punto muy importante sobre el cual ha insistido Risler. Se examinará el subsuelo en cuanto á su estructura física, y convendrá tomar muchas muestras de él en una profundidad de algunos decímetros. Aun cuando su color difiere á menudo del color del suelo, con frecuencia ocurre que el subsuelo contiene una cantidad muy apreciable de substancias fertilizantes. Un certificado de análisis deberá siempre contener un estudio geológico sumario de la región; indicará la inclinación del suelo respecto del horizonte y la dirección de esta pendiente; indicará, también, la temperatura media del lugar y el régimen de las aguas.

A. Interpretación del análisis físico.—Esta interpretación ha sido intentada por muchos autores, muy á menudo en casos particulares. Deseando mantenernos en generalidades sobre este punto, nos contentaremos con resumir aquí las reglas formuladas respecto de este asunto por Lagatu y Sicard, reglas que nos parecen á la vez simples y prácticas (1).

Ya se trate del análisis físico, ya del análisis químico de una tierra, *hay que comparar estos análisis con los de una tierra tipo*. Para ello, se tomarán muestras de tierras diversas que, *según la sola observación, hecha fuera de toda consideración científica, posean determinadas cualidades, ya sea desde el punto de vista físico, ya sea desde el punto de vista del rendimiento*; se analizarán *y se anotará así un gran número de coincidencias entre un conjunto de resultados analíticos y un conjunto de cualidades agrícolas*.

El tipo más perfecto de una tierra de labor es la tierra llamada *franca*, sobre cuyas propiedades existe unanimidad. Desde el punto de vista físico, esta tierra es permeable al agua y á los gases; se deja trabajar fácilmente, no se reúne en terrones compactos y no se hiende con la sequedad; no se deslíe con las lluvias abundantes, no se levanta con las heladas, y el viento no la arrastra. Descansa sobre un subsuelo permeable.

El análisis físico de esta tierra, hecho con la tierra fina que pasa por el tamiz de 10 mallas por centímetro, da *las siguientes cifras medias*:

(1) *Guide pratique élémentaire pour l'analyse des terres et son utilisation agricole, par H. Lagatu et L. Sicard. 1901*, páginas 175 y siguientes.

En 100 partes:

Arena gruesa	600 á 700 partes.
Arena fina	200 á 300 —
Arcilla	60 á 100 —
Humus	0,1 á 30 —
Calcáreo (repartido casi igualmente entre la arena fina y la arena gruesa). . .	50 á 150 —

Hay que notar que una tierra puede convenir muy bien á una planta y, sin embargo, presentar en el análisis una cifra muy elevada de arena fina, es decir, ser más compacta, mientras que otra planta sólo prosperará en un terreno rico en elementos gruesos, es decir, más ligero. La tabla anterior no constituye, pues, más que una media de cifras ventajosas, deducidas de numerosas comparaciones entre el análisis y los rendimientos satisfactorios de los cultivos.

Lagatu y Sicard hacen observar que importa, ante todo, conocer, respecto de un suelo dado, cuál es su grado de compacidad ó de permeabilidad: es inútil repetir aquí la definición de estas expresiones; ya hemos indicado varias veces su significación.

La *impermeabilidad* de una tierra reconoce dos orígenes. Las partículas térreas pueden estar contiguas porque los intervalos que existen entre ellas son muy pequeños; ó bien los intervalos entre las partículas están llenos de una substancia que se comporta como un cemento. Compacidad é impermeabilidad están, pues, determinadas por causas análogas.

Una tierra está formada por cascajo y piedras por una parte y por tierra fina por otra. «*En todos los casos, la proporción de tierra fina es más que suficiente para llenar completamente todos los intervalos que dejan entre sí las piedras y el cascajo. Por lo tanto, sólo la tierra fina determina la compacidad ó la permeabilidad; sólo ella, en efecto, es la que ofrece, ya á los sólidos, ya á los líquidos, resistencia que hay que vencer; porque los elementos gruesos, si estuviesen solos, no estarían unidos por cohesión alguna y dejarían entre ellos anchos espacios que los líquidos podrían atravesar con extremada facilidad*.»

Resulta de esto que es posible definir el grado de compacidad ó de permeabilidad de una tierra por el solo análisis físico de la tierra fina.

El *papel* de cada uno de los componentes de esta tierra puede ser definido así: *La arena gruesa es un elemento de división*, es decir, de *permeabilidad; la arena fina, un elemento de compacidad y de impermeabilidad; la arcilla, un elemento de plasticidad si el agua está en pequeña proporción; el humus, un elemento de aglutinación de las partículas arenosas si se trata de una tierra ligera, un elemento de división y de aereación si se trata de tierras arcillosas.*

En cuanto al calcáreo, su papel consiste en modificar las propie-

dades plásticas de la arcilla: deberá ser tanto más abundante cuanto más elevada sea la proporción de la arcilla. Una tierra muy poco calcárea y fuertemente arcillosa se deslíe por la acción del agua de lluvia, que permanece mucho tiempo en la superficie si ésta es horizontal, ó resbala, sin penetrar, si esta superficie es inclinada.

Fijado ya el papel de cada uno de estos elementos, estamos en disposición de interpretar las cifras de la tabla de la página anterior, relativas á la composición media de una tierra franca.

Hemos visto que esta tierra debe contener de 600 á 700 partes de *arena gruesa*. Si esta cifra parece elevada, debe recordarse que las raíces exigen la presencia en el suelo de fragmentos bastante voluminosos para que, dejando entre ellos espacios vacíos, no impidan su desarrollo y permitan circular libremente al agua y al aire. Cuando la proporción de arena gruesa llega á 800 por 1000, siendo la arcilla inferior á 100, el suelo retiene mal los líquidos; se entra en el dominio de las tierras llamadas *ligeras*. Estas pasan á ser muy ligeras cuando la cifra de la arena gruesa llega á 900 por 1000.

La *arena fina* ejerce sobre la estructura del suelo una influencia que varía con la proporción de la arcilla que la acompaña. Si la arcilla no existe más que en pequeña cantidad, ó si falta, la arena fina es arrastrada por las aguas meteóricas; entra en contacto íntimo con los elementos gruesos y obstruye todos los espacios libres que asegurarían la circulación de los líquidos y de los gases. Aun cuando se modificara un suelo de esta naturaleza mediante labores y así se le comunicara cierto grado de permeabilidad, estas mejoras sólo serían pasajeras; porque, á causa de nuevas lluvias, este suelo volvería á su primitivo estado; recobraría el mismo grado de impermeabilidad *que tiene una causa de orden mecánico*. Por otra parte, raramente se presenta este caso. Cuando, por el contrario, la arena fina va acompañada de arcilla, subsiste la división en partículas y el agua circula en los intersticios del suelo; de 50 á 70 por 1000 de arcilla bastan para ello. Si la proporción de arcilla asciende á 150 por 1000, la tierra adquiere cierto grado de cohesión, que aumenta cuando crece la proporción de esta substancia. La tierra pasa á ser una *tierra fuerte*.

Si la proporción de arena fina llega á 500 por 1000, y si la arcilla sigue siendo de 150, la tierra se llama *asfixiante:* las raíces penetran mal y no encuentran suficiente cantidad de aire. El trabajo mecánico de estas tierras es penoso y su cultivo muy difícil. En las capas no afectadas por los aperos de labranza, el agua se estanca indefinidamente.

Tal es el significado general que debe darse á las cifras de la tabla y tales son los informes que se pueden sacar de ellas.

De todos modos, Lagatu y Sicard hacen observar que esta interpretación no es completamente precisa á causa de las convenciones admitidas para separar la arena gruesa, la arena fina y la arcilla. En efecto, hemos visto anteriormente que la arcilla, tal como es

definida en el análisis físico, en realidad está compuesta de dos elementos: la mayor parte es de arena muy fina, cuya sedimentación completa sólo se obtendrá en un período de tiempo incompatible con las exigencias del análisis. En cuanto á la verdadera *arcilla coloide*, no existe más que en muy pequeñas proporciones. La porción llamada *arcilla* es, pues, en realidad, una mezcla de origen bastante convencional.

B. Interpretación del análisis químico. — **Esta interpretación es bastante fácil por lo que toca al nitrógeno, la cal y el ácido fosfórico; es más difícil respecto de la potasa.** Requiere siempre mucha prudencia y exige ciertas restricciones. **Desde el punto de vista general, á menudo se tiene la costumbre de considerar que tiene una** riqueza satisfactoria **una tierra que contenga por kilogramo** de materia seca: **nitrógeno = 1, calcáreo = 10 á 50, potasa = 2;** habiendo sido efectuadas estas determinaciones por medio del ácido nítrico **empleado en caliente.** Lagatu y Sicard hacen notar que esta proporción de materias alimenticias no representa *una riqueza media*, porque muchos suelos no contienen tanta **cantidad, á lo menos** respecto de una de estas substancias. **Según estos autores,** *la riqueza satisfactoria expresada por las anteriores cifras*, es la que permite con facilidad el cultivo intensivo sin mejoras de importancia de la tierra: esto es lo que resulta de un gran número de comparaciones. Se puede expresar el hecho diciendo que: entre la composición de una tierra y su grado de fertilidad, existe una relación evidente. Si la tierra tiene la citada riqueza respecto de todos los elementos, excepto respecto de uno, no debe deducirse que es inepta para el cultivo intensivo: no se prestará á ello más que mediante una mejora profunda, cuya importancia podrá sobrepujar á las operaciones del cultivo ordinario. Ocurre á veces que este mejoramiento de la tierra es barato: pero, en general, los resultados que hay derecho á esperar de **ella se consiguen con lentitud.**

Si entramos ahora por algunos momentos en el pormenor de la interpretación del análisis químico, nos será fácil deducir algunas conclusiones interesantes de las discusiones que hemos suscitado en el presente capítulo.

Variaciones de la proporción de los elementos de fertilidad.—A. NITRÓGENO; CALCÁREO.—Será preciso, en el certificado del análisis, consultar ante todo las cifras que expresan la proporción del carbonato cálcico total y la del calcáreo fino. Estas cifras, muy importantes, no tienen, sin embargo, más que un valor relativo si se examinan aisladamente. Deberán relacionarse con la cifra que representa el nitrógeno total. En efecto, la alcalinidad del suelo es indispensable para la evolución de los fenómenos de combustión, y en particular para la nitrificación. Una escasa proporción de calcáreo (5 á 10 por 1000) puede bastar en ciertos cultivos en el caso de que el nitrógeno no alcance más que á la proporción de 0,5 por 1000, por ejemplo. Pero, si el humus es abundante y, por consiguiente, también el nitrógeno orgánico, es necesario que la proporción del calcáreo sea mucho más elevada para saturar la substancia húmica, y es preciso que este calcáreo se encuentre todavía en exceso una vez obtenida esta saturación.

Una proporción de calcáreo que llegue á 20, 50 y aun 100 por 1000, comunica al suelo una actividad química muy grande, si la proporción del nitrógeno total está comprendida entre 1,5 y 2 por 1000. La aplicación repetida de estiércol ó de abonos verdes no puede dar resultados de cultivo satisfactorios más que cuando la proporción del calcáreo llega á una cifra suficiente. Hemos indicado antes (pág. 348) de qué manera se puede determinar el grado de acidez de un suelo: es indispensable que nunca se llegue á presentar esta acidez, porque un suelo ácido sería incapaz de dar cosechas remuneradoras, por ejemplo de cereales. No es, pues, la cifra *absoluta* del nitrógeno lo que conviene considerar: es preciso saber si este nitrógeno se encuentra en condiciones en que pueda nitrificarse y ponerlo en estado de sufrir esta transformación. Y el nitrógeno no es capaz de tomar la forma nítrica más que en presencia de un exceso de calcáreo. Á un suelo rico en humus debe corresponder una proporción de calcáreo tanto mayor cuanto más elevada sea la proporción de este mismo humus.

Recíprocamente, cuando, en un certificado de análisis, nos encontramos con una gran proporción de calcáreo (100 por 1000, por ejemplo), y una proporción de nitrógeno muy escasa (0,5 por 1000), el empleo del estiércol ó de abonos verdes será ventajoso. Sin embargo, no debe olvi-

darse que un exceso de calcáreo produce una combustión muy rápida del humus. Existe, pues, una especie de equilibrio entre el nitrógeno y el calcáreo: el certificado de análisis nos enseña cuál es el sentido de las reacciones entre estos dos elementos, y nos guía respecto de las modificaciones á que debemos someter el suelo cuando predominan la cal ó el nitrógeno (es decir, el humus).

Si el certificado de análisis no señala más que indicios de calcáreo con exceso de humus, se impone el encalado ó la adición de marga. Cuando al lado de indicios de calcáreo encontramos una escasa proporción de nitrógeno, como sucede en los terrenos graníticos, la adición de nitrógeno soluble (nitratos, sales amoniacales) puede prestar grandes servicios. Suponemos, por el momento, que los demás elementos de fertilidad (potasa, ácido fosfórico) se encuentran en proporciones suficientes.

No debe perderse de vista que el calcáreo, añadido artificialmente al suelo en el caso en que las tierras carecen de este elemento, se disuelve de una manera continua y es arrastrado por las aguas de infiltración en forma de bicarbonato cálcico. Cuando, además, el suelo requiere abonos, tales como sulfato amónico, sulfato ó cloruro potásicos, un peso de cal correspondiente al peso del ácido sulfúrico ó clorhídrico es igualmente eliminado. De manera que es necesario *vigilar la descalcificación del suelo* y volver á introducir, en tiempo oportuno, una proporción de calcáreo igual á la que así desaparece; porque hay que temer ver reaparecer la acidez del suelo con todos sus inconvenientes.

Es necesario, de todos modos, observar que las condiciones que acabamos de formular, relativamente á las relaciones que deben existir entre el nitrógeno y el calcáreo, no son sensiblemente verdaderas más que cuando la tierra es bastante permeable. En el caso de las tierras fuertes, y sobre todo en el de las tierras muy arcillosas, un exceso de cal es todavía más indispensable para coagular la arcilla y para comunicar al suelo un grado de permeabilidad compatible con la nitrificación.

Se ve, pues, y es éste un punto esencial, que la interpretación del análisis químico está subordinada á la del análisis físico de una tierra. Como hace observar, con razón, la nota de los *Métodos del comité consultivo de las estaciones agronómicas*, es difícil precisar el límite en que el suelo no contiene ya bastante calcáreo para gozar de todas sus propiedades físicas, puesto que este límite varía con las proporciones de los demás elementos.

Se puede admitir, *en resumen*, que, cuando se supone suficiente la riqueza en calcáreo y conveniente el grado de permeabilidad de un suelo dado, es posible, *desde el punto*

de vista de su riqueza en nitrógeno, clasificar las tierras de la siguiente manera:

1.º *Tierras muy ricas* que contienen 2 por 1000 de nitrógeno y más. Semejantes suelos no requieren abonos nitrogenados y pueden alimentar cosechas, aun exigentes, durante un gran número de años.

2.º *Tierras ricas* que contienen de 1,5 á 2 por 1000; las mismas conclusiones.

3.º *Tierras medianamente ricas* que contienen de 0,8 á 1,2 por 1000 de nitrógeno. Estas tierras á menudo necesitan abonos nitrogenados, insolubles ó no, según su estructura física. En efecto, si se admite que una tierra contiene 1 por 1000 de nitrógeno, que su espesor sea de 40 centímetros y que la centésima parte de este nitrógeno toma en el curso de un año la forma nítrica, las plantas no podrán disponer más que de 40 kilogramos de nitrógeno soluble, y de 80 kilogramos si la quincuagésima parte de este nitrógeno se nitrificase. En realidad, sólo se conoce muy imperfectamente la fracción de este nitrógeno orgánico, que se vuelve soluble en el curso de un año; las cifras precedentes representan poco más ó menos las proporciones extremas. Pues bien, la vegetación activa de ciertas plantas, especialmente la de los cereales, es de corta duración. Un peso de 40 y aun de 80 kilogramos de nitrógeno nítrico, á menudo es insuficiente para asegurar á estas plantas un desarrollo capaz de dar grandes rendimientos. Además, la planta nunca toma al suelo la totalidad del nitrógeno nítrico que éste contiene: de donde deriva la frecuente necesidad de aplicar abonos nitrogenados solubles suplementarios, suponiéndose, bien entendido, que los demás elementos de fertilidad existen en proporciones convenientes.

4.º *Tierras pobres,* que contienen de 0,5 á 0,8 por 1000 de nitrógeno.

5.º *Tierras muy pobres,* que contienen menos de 0,5 por 1000 de nitrógeno. En estos dos últimos casos, la adición de estiércol ó de abonos nitrogenados solubles, según la constitución física de la tierra, se impone de un modo absoluto.

B. Ácido fosfórico. — Frecuentemente se adopta la nomenclatura siguiente para expresar la riqueza relativa de las tierras en ácido fosfórico.

Tierras muy ricas, con más de 2 por 1000; *tierras ricas,* con 1 á 2 por 1000; *tierras medianamente ricas,* con 0,5 á 1 por 1000; *tierras pobres,* con 0,1 á 0,5 por 1000; *tierras muy pobres,* con menos de 0,1 por 1000.

Se puede afirmar que, si una tierra contiene 2 por 1000 de ácido fosfórico ó más, figurando los demás elementos en convenientes cantidades, la adición de fosfatos es absolutamente inútil; esta tierra puede suministrar durante largos años buenas cosechas. En efecto, las necesidades de las plantas, aun de las más exigentes en esta substancia, son siempre inferiores á sus necesidades en nitrógeno. Una exportación de 50 kilogramos de ácido fosfórico por año y por hectárea, por los cultivos, constituye una cifra elevada. Inversamente, se puede afirmar que una tierra que contenga menos de 0,7 á 0,6 por 1000 de ácido fosfórico se aprovechará del empleo de los abonos fosfatados.

Pero, cuando se trata de tierras que contienen de 0,8 á 1,5 por 1000 de ácido fosfórico, frecuentemente existe incertidumbre sobre la utilidad de estos abonos. Es éste el caso en que el empleo de reactivos, tales como el ácido cítrico ó el ácido acético, con las concentraciones antes indicadas (páginas 255 y 369), presta reales servicios. Se podrá formular entonces una opinión, fundada en la determinación de la fracción del ácido fosfórico que solubilizarán los reactivos citados, observando las reglas que respecto de esto indicamos: 400 á 500 kilogramos de ácido soluble por hectárea representan una riqueza alimenticia más que suficiente en la mayoría de los casos.

Por último, el empleo del agua carbónica, si se generalizase este método de determinación, daría aún mejores resultados.

C. Potasa.—La interpretación de la cifra que indica la proporción de potasa de una tierra, es más difícil que la de los anteriores elementos. Como ya hemos hecho observar, es debido esto á que los reactivos usuales, tales como los ácidos

enérgicos, no disuelven generalmente más que una fracción bastante pequeña de este álcali. Por otra parte, la mayoría de las tierras calificadas de tierras de labor contienen grandes proporciones de potasa. La cifra de 1 á 2 por 1 000 de potasa soluble en el ácido nítrico es considerada con frecuencia como representando una riqueza satisfactoria: bastaría entonces no añadir al suelo más que abono de cuadra. Por debajo de esta cifra, el empleo de las sales potásicas sería ventajoso. Es preciso convenir en que esta conclusión es muy poco consistente. El empleo del ácido cítrico, como en el caso de la determinación del ácido fosfórico asimilable, puede también aquí prestar servicios. Pero, nada vale tanto en este caso como la experimentación directa en el suelo. En efecto, las necesidades de las plantas en potasa varían entre límites extremadamente apartados: las plantas-raíces y los tubérculos son muy exigentes en este álcali.

Conclusiones: salvedades que deben hacerse en las interpretaciones.—Debe deducirse de esta discusión que la interpretación juiciosa de un certificado de análisis es capaz de prestar preciosos servicios: los dos análisis, físico y químico, se completan, y se puede adelantar que el primero tal vez sea el más importante. Porque él es el que nos indica inmediatamente las mejoras á que hemos de someter el suelo para ponerlo en estado de nutrir á tal ó cual planta de cultivo; él es el que nos guía respecto de la naturaleza de los abonos que deben introducirse en el suelo y que nos enseña, á veces en seguida, que un suelo será siempre inepto para una planta porque, cualquiera que sea su riqueza en elementos de fertilidad, su constitución física es defectuosa y no es susceptible de ser mejorada de un modo práctico y económico. En cuanto al análisis químico, posee indiscutiblemente un valor real en lo que se refiere á la evaluación de la proporción de la cal, del nitrógeno y del ácido fosfórico.

Pero, conviene no atribuir á un certificado de análisis una importancia demasiado grande. Es preciso, en efecto, tener siempre en cuenta, como ya hemos dicho antes, la *noción de clima*. Este factor, cuyos términos son tan numerosos y á veces tan difíciles de definir, desempeña en la cuestión en que nos ocupamos un papel de primer

orden. La experimentación directa en el suelo permitirá, en un sitio determinado, conocer cuál es el peso de la cosecha que puede dar una planta dada. También es indispensable fijar respecto de este punto una media relativa á cierto número de años, á fin de eliminar, en lo posible, la tan variable influencia de los factores *temperatura* y *humedad*. Si, entonces, se compara el peso de estas cosechas con el de las cosechas obtenidas en otras localidades, bastante próximas á la en que se opera y cuyo rendimiento es más elevado, se podrá deducir que falta algo al suelo: el análisis comparativo de las tierras de dos localidades dará, generalmente, indicaciones bastante precisas; y se verá la conveniencia de introducir en el suelo la substancia fertilizante que falta parcialmente. Ocurre á veces que la adición de esta substancia no aumenta la proporción de las cenizas de la planta en la misma substancia, pero que favorece la absorción de otro elemento indispensable y, por esto, aumenta el peso de la materia seca del vegetal.

Terminemos con algunas indicaciones relativas á *la instalación de campos de experimentos.*

Una práctica, muy recomendable por lo que toca á los cultivos que pueden darse en un suelo determinado, consiste en seguir el desarrollo de una planta en una extensión limitada de terreno. Se dividirá una tierra en cierto número de parcelas, de unos 100 metros cuadrados de superficie. En cada parcela se sembrará la semilla destinada á darnos el vegetal que nos proponemos cultivar. La primera parcela no habrá recibido previamente ningún abono; á la segunda se aplicará nitrógeno mineral en determinada proporción; á la tercera se le aplicará nitrógeno orgánico (estiércol); á la cuarta, potasa; á la quinta, fosfatos, etc. Se anotarán, en cada caso, todas las particularidades que presentará el desarrollo de la planta, como la época de la florescencia y la de la maduración. La comparación del peso de las cosechas permitirá darse cuenta de la naturaleza del elemento fertilizante que esté en defecto y, por consiguiente, del que conviene añadir en la región en que se opera. Esto es lo que podría llamarse *análisis racional del suelo por medio de la planta*. Es evidente que estos ensayos no tienen valor más que para un vegetal determinado. A veces, será necesario aplicar al suelo, no una, sino dos materias fertilizantes.

En el caso en que los rendimientos de las diferentes parcelas fuesen igualmente muy medianos, sería preciso deducir que la constitución física del suelo es defectuosa, por lo menos respecto de la planta elegida, y que este suelo no puede prestarse á su cultivo más que con la condición de mejorarlo.

No hay que decir que este procedimiento de análisis por las plantas no excluye los análisis físico y químico previos del suelo. Frecuentemente ocurrirá que el análisis químico bien hecho indicará, por adelantado y sin ambigüidad, la naturaleza y la forma con que deberá aplicarse á este suelo un elemento de fertilidad.

CAPÍTULO XI

PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO

Generalidades sobre los seres vivos que habitan en el suelo.—Presencia y papel de los microorganismos en el suelo.—Distribución de los microbios en el suelo.—Oxidaciones producidas por vía química y por vía microbiana.—Fenómenos de combustión que afectan al carbono y al hidrógeno.—Fenómenos de hidrolisis de la materia nitrogenada compleja, producción de amoníaco.—Fenómenos de fijación del nitrógeno gaseoso; aplicaciones prácticas.—Fenómenos de oxidación que transforman al amoníaco en los ácidos nitroso y nítrico: nitrificación.—Historia; trabajos de Boussingault.—Condiciones de la nitrificación; la nitrificación es correlativa de la presencia de un ser vivo; trabajos de Schlœsing y Müntz; trabajos de Winogradsky.—Nutrición carbonada de los microbios nitrificantes.—Nitrificación intensiva.—Fenómenos de reducción de los nitratos y de ciertas substancias nitrogenadas.—Venenos del suelo.

I

GENERALIDADES SOBRE LOS SERES VIVOS QUE HABITAN EN EL SUELO

Presencia y papel de los microbios en el suelo.—Se puede decir que la tierra vegetal es el depósito general de casi todos los microorganismos conocidos. Unos crecen y prosperan con facilidad en este medio porque éste contiene los alimentos apropiados para su desarrollo; otros viven en él en estado latente, en estado de vida adormecida, porque la composición de los alimentos que encuentran ó la de la atmósfera ambiente no les conviene ó les conviene poco. Cuando

estos dos factores experimentan un cambio en sentido favorable á la evolución de estos microorganismos, es cuando se les ve pulular.

Entre la infinita variedad de los seres microscópicos que pueblan el suelo, hay un gran número que ofrecen un interés de primer orden para la agricultura.

Estudiando los fenómenos de combustión de la materia orgánica en el suelo que conducen á la formación última de gas carbónico y agua (pág. 301), hemos hecho notar que estas combustiones pueden, sin duda, efectuarse por el juego de reacciones puramente químicas, como ocurre, por ejemplo, en la oxidación del óxido ferroso ó del ácido oxálico en disolución. Estas reacciones, puramente químicas, son fáciles de realizar esterilizando una masa de tierra, ya sea por el calor, ya sea por contacto con antisépticos apropiados. Wollny ha demostrado, en una serie muy interesante de investigaciones, cuál era la influencia comparada de los diversos antisépticos sobre el desprendimiento del gas carbónico producido por tierras ricas en humus, calentadas á 30°, con ó sin antisépticos. Una proporción de timol igual á 1 por 100 del peso de la tierra, en uno de los experimentos, ha reducido á $^1/_{13}$ el desprendimiento del gas carbónico; en fin, la aplicación de una temperatura de 115° ha reducido este desprendimiento á cosa del $^1/_{85}$. Este proceso de oxidación, debido al solo juego de las fuerzas químicas, es, pues, extremadamente lento, y la materia orgánica del suelo subsistiría casi indefinidamente y se acumularía en cantidades considerables si ciertas categorías de microorganismos no interviniesen de una manera activa para hacer actuar el oxígeno sobre el carbono y el hidrógeno de las substancias que han pertenecido al mundo organizado.

Los microorganismos del suelo son, pues, los agentes más enérgicos de destrucción de la materia carbonada y nitrogenada; su papel consiste en separar primero unos de otros los núcleos complejos de esta materia, y atacar luego las agrupaciones más sencillas. Los últimos términos de estas transformaciones son el agua, el gas carbónico, el amoníaco, el ácido nítrico, el nitrógeno. El concurso de los microorganismos del suelo no es, sin embargo, indispensable á las plantas. Un vegetal cualquiera, superior é inferior, puede desarro-

llarse en una solución nutritiva estéril y aun en una masa sólida exenta de microorganismos.

En las páginas siguientes vamos á limitarnos estrictamente á las intervenciones microbianas que son de alguna utilidad para el agricultor, prescindiendo de lo que se refiere á la biología propiamente dicha de los infinitamente pequeños á los cuales son atribuíbles los fenómenos que nos falta describir.

Microbios aerobios y anaerobios.—Desde el punto de vista elemental, en el suelo se efectúan dos suertes de acciones microbianas.

Á los organismos aerobios corresponde ser los agentes puramente oxidantes, esencialmente bienhechores, porque suministran á los vegetales, de una manera directa ó no, las primeras materias de sus alimentos: ácido carbónico, agua, ácido nítrico. Algunos fijan simplemente el agua sobre una substancia orgánica (la urea, por ejemplo).

Á los organismos anaerobios corresponde otro papel: éstos se desarrollan en el seno de una atmósfera poco ó nada oxigenada; atacan á ciertas substancias orgánicas que desdoblan con formación de un producto más sencillo que el producto inicial y más rico en hidrógeno que él; al mismo tiempo desprenden gases, entre los cuales se observa constantemente el ácido carbónico. El hidrógeno ó el metano acompañan siempre á este último; en ciertos casos se ve también aparecer el nitrógeno y el óxido nitroso. Pero, es esencial observar que el desprendimiento de gas carbónico que provocan, en ausencia del oxígeno, los organismos anaerobios trabajando en contacto con ciertas substancias, no es una propiedad general de la célula. Este desprendimiento no depende más que de la *naturaleza* de los alimentos de que esta célula dispone.

Los fenómenos que son la consecuencia de la vida microbiana están comprendidos con la denominación general de *fenómenos de fermentación:* el microbio actúa por las *secreciones diastásicas* que elabora (1).

Algunas especies anaerobias habitan en el suelo; desem-

(1) Sobre las enzimas ó diastasas producidas por las bacterias, en general, puede consultarse la obra del Dr. Franz Fuhrmann: *Vorlesungen über Bacterienenzime*. Jena, 1907.—C. B.

peñan en él, como diremos luego, un papel á veces nefasto cuando, por efecto de circunstancias temporales ó definitivas, encuentran las condiciones favorables á su existencia.

En ciertas fermentaciones de que se aprovecha la agricultura, como la fermentación del abono de cuadra, se efectúan los dos fenómenos á la vez. Si la fermentación anaerobia modifica la masa orgánica en un sentido favorable á la simplificación de la materia compleja inicial, á veces origina una pérdida de nitrógeno en estado gaseoso bastante difícil de explicar y cuya causa parece obscura.

La influencia del medio es capital cuando se trata de fermentaciones. No solamente la presencia ó la ausencia del oxígeno favorece, dificulta ó anula el desarrollo de ciertas especies, sino que la alcalinidad ó la acidez de este medio regula la intensidad de las transformaciones químicas en un sentido determinado, permitiendo ó impidiendo la evolución de toda clase de infinitamente pequeños. Así es que el humus de las turberas persiste y se acumula, aun en contacto con el oxígeno del aire, porque las únicas especies microbianas que pueden adaptarse á un medio ácido tienen un poder oxidante muy débil. El microbio nítrico permanece allí inerte. Si se modifica la reacción de la masa ácida con la adición de una base (cal, calcáreo), ciertos microbios aerobios, hasta entonces incapaces de actuar en aquel medio, adquieren el predominio y destruyen con facilidad la materia orgánica. El fermento nítrico, ayudado en su trabajo por otras especies aerobias, lleva entonces el oxígeno al amoníaco con producción de ácido nítrico.

Es necesario añadir también que, si un microorganismo no se desarrolla más que en un medio ácido, y otro en un medio alcalino, *la cuestión de la concentración del ácido ó del álcali* desempeña un papel muy importante: un exceso del uno ó del otro puede comprometer ó anular la existencia del microbio, á veces hasta modificar sus propiedades fisiológicas. Sin embargo, algunas bacterias son indiferentes á la reacción del medio.

La presencia ó la ausencia del oxígeno produce frecuentemente,

en algunos microorganismos, profundas modificaciones en sus propiedades biológicas y morfológicas: se sabe que la levadura de cerveza, por ejemplo, inmergida en un líquido azucarado, al abrigo del aire, transforma al azúcar en alcohol y ácido carbónico, pero que su prolificación es retardada. Si la levadura no está inmergida, si vive en la superficie, se multiplica destruyendo el azúcar: también origina gas carbónico, pero no produce más que pequeñas cantidades de alcohol.

El cambio de reacción del medio, si es gradual, puede hacer perder á ciertos microorganismos la facultad de desarrollarse en el medio en que vivan habitualmente: las acciones químicas que ocasionan difieren notablemente en los dos casos.

Notemos, por último que, si existen microbios aerobios y anaerobios, *obligatorios ó estrictos,* también existen microorganismos que presentan, según las condiciones del medio, una aerobiosis ó una anaerobiosis *facultativas.*

Entre los agentes exteriores capaces de influir en el desarrollo de los seres microscópicos, deben citarse: 1.°. *la luz,* cuya acción es muy compleja y que destruye una multitud de microorganismos en presencia del oxígeno; 2.°, *el calor;* nos limitaremos á decir, á propósito de este factor, que, por regla general, la multiplicación de los microorganismos sólo empieza á cierta temperatura, superior á 0°, aunque algunas especies pueden desarrollarse por debajo de ella. La multiplicación se acelera con la elevación de la temperatura y alcanza un máximo, después decrece hasta la muerte del microorganismo. La temperatura que provoca la destrucción de la vitalidad varía mucho con la especie. Probablemente existen en el suelo microbios que pueden resistir una temperatura de 100°, á lo menos durante algunos minutos; de donde deriva la dificultad con que se tropieza para esterilizar una masa de tierra algo considerable. Muchos microorganismos del suelo pueden resistir temperaturas extremadamente bajas, inferiores á -100° y aun más bajas, sin dejar de existir: su vida queda entonces adormecida.

La temperatura óptima de actividad de la mayoría de las especies microbianas que habitan en la tierra de labor está comprendida entre 30 y 40°.

Distribución de los microbios en el suelo. — Dada la importancia del papel que desempeñan en el suelo los microorganismos, es indispensable conocer, á lo menos aproximadamente, su situación en las diferentes capas térreas y hasta el número aproximado en un volumen de tierra.

He aquí, sobre este punto, algunos datos suministrados por Duclaux. Los microorganismos se comportan como los coloides; se adhieren fácilmente á las substancias sólidas que les rodean. De acuerdo con la observación, las capas superiores serán las más car-

gadas de infinitamente pequeños, al mismo tiempo que estas capas son las más cargadas de materias orgánicas en general. Si se examina *la distribución cualitativa* de los infinitamente pequeños, se observa que las capas superiores contienen siempre la materia orgánica más coloide, la más próxima al estado que tenía cuando formaba parte de seres vivos (plantas ó animales) y, por consiguiente, la menos difusible. Esta materia superficial está poblada de los microbios que deben transformarla, y cuyas condiciones de alimentación presentan más exigencias. Se puede atribuir á este grupo de microorganismos una distribución representada por la curva AA′ (en el eje Ox se aplican las longitudes proporcionales al número de los microbios: el eje Oy indica la profundidad del suelo). Esta curva no es necesariamente regular; sus irregularidades pueden ser atribuídas á cambios en la constitución del suelo (fig. 8).

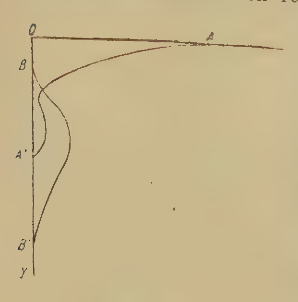


Fig. 8.

En cuanto á los seres microscópicos que emplean para su alimentación los residuos orgánicos que los microbios de la superficie han separado de las moléculas iniciales complejas, éstos se encuentran á una mayor profundidad. En efecto, estos residuos orgánicos son más difusibles que los núcleos primitivos; se hundirán por lo tanto en el suelo y precisamente en el sitio donde penetren es donde se hallarán los microbios de la segunda categoría cuya distribución puede ser representada por la curva BB′.

Fácilmente se comprenden las dificultades casi insuperables que presentan la investigación del número de microorganismos del suelo y su aislamiento. Cada uno de ellos tiene su elemento favorito: unos son aerobios y otros anaerobios. Respecto de este punto, sólo puede llegarse á resultados muy incompletos. He aquí, sin embargo, algunas indicaciones muy sumarias sobre este tema especial.

Koch y después Fraenkel (1887) han demostrado que el número de los infinitamente pequeños que pueblan la tierra decrece á medida que se profundiza en el suelo. Esta disminución no es siempre absolutamente regular. Puede ocurrir que, á un metro de profundidad, no se observen ya microorganismos en un suelo que no ha sido removido. A veces se les encuentra á profundidades bastante grandes: Fraenkel, en un suelo de los alrededores de Postdam, los ha encontrado hasta á 4 metros. Según la época del año, una capa estéril en

un momento dado puede contener algunos meses más tarde microorganismos. El número de éstos es extremadamente variable en la superficie del suelo, donde de preferencia pululan. Fraenkel, en el suelo que se acaba de citar, contó por centímetro cúbico 150,000 en 27 de mayo de 1886, 300,000 en 24 de agosto, 130,000 en 2 de octubre, 55,000 en 3 de noviembre. En estas cifras no están comprendidos los microbios nitrificantes, cuyo método de cultivo se ignoraba todavía en la época de los experimentos de Fraenkel.

Realmente, el número de microorganismos que contiene el suelo varía en proporciones considerables; no es raro hallar en la superficie de las tierras cultivadas muchos millares de gérmenes en 1 gramo de tierra. Una consecuencia importante deriva de esta flora microbiana. La intensidad respiratoria de los microorganismos es enorme: varía con la capacidad del suelo para el aire y el agua, el número de seres vivos y su grado de vitalidad, la naturaleza de las substancias orgánicas que ellòs atacan, la cantidad y la naturaleza de los abonos, la naturaleza de las plantas cultivadas. También entra en juego el trabajo mecánico del suelo.

Stoklasa (1911) ha hecho sobre esta materia comparaciones muy importantes. Este autor ha encontrado las cifras siguientes relativamente: 1.º, al número de microorganismos contenidos en 1 gramo de tierra á diversas profundidades; 2.º, á la cantidad de gas carbónico desprendido por 1 kilogramo de tierra con 25 por 100 de agua (muestras tomadas á un mismo nivel): la tierra era barrida durante veinticuatro horas por una corriente de aire puro á 20º.

(α = tierra de prado no trabajada y no abonada: β = la misma tierra, trabajada desde dos años, abonada con abonos químicos y plantada de trébol el año del experimento; γ = esta misma tierra, trabajada cada año, abonada con estiércol y abonos químicos, plantada de remolachas el año del experimento.)

Profundidad á que se tomaron las muestras de tierra	Número de microorganismos en 1 gramo de tierra			Pesos de CO^2 desprendidos por kilogramo de tierra en 24 horas (en miligramos)		
	α	β	γ	α	β	γ
10 á 20 centím.	230000	1800000	4700000	16,5	38,6	47,5
20 á 30 —	256000	2350000	3529000	19,4	38,8	49,7
30 á 50 —	208000	1600000	2100000	9,8	20,2	28,5
50 á 80 —	14000	510000	184000	3,3	6,3	6,6
80 á 100 —	5000	72000	95000	2,1	2,7	2,3

Se ve en las cifras de esta tabla que la intensidad respiratoria de los microorganismos está en relación directa con su número.

Conviene observar que la escasez de microorganismos ó su ausencia, en las capas profundas, puede ser á menudo no más que aparente: ciertas capas del suelo sólo parecen estériles porque los microbios que las pueblan rehusan desarrollarse en los medios que se les ofrecen. Sin embargo, es posible también que la esterilidad de las capas profundas sea real, puesto que el suelo actúa como un filtro: además, la cuestión de la temperatura entra probablemente en juego: ciertas especies se desarrollan mal, ó nada cuando la temperatura baja más allá de determinado límite.

El microbio nítrico, uno de los que más nos interesan, ha sido encontrado por Warington hasta una profundidad de 46 centímetros, y, en una determinación, hasta la de 91 centímetros. Este autor, en una serie de investigaciones posterior (1887) lo ha descubierto á 1,50 m. y á 1,80 m. Aun cuando el microbio nítrico vive de una manera muy particular y su alimentación es puramente mineral, como veremos más tarde, pulula, sobre todo, en la superficie del suelo. Sin embargo, el suelo ácido de algunos prados, el de muchos bosques, el de las turberas, no contienen microbios nítricos ó, á lo menos, éstos no son muy abundantes.

Desde el punto de vista de las *especies* encontradas en la tierra de labor, se puede decir, de una manera general, que el número de las bacterias domina sobre el de las mucedíneas. Estas, por el contrario, dominan en las tierras ácidas, donde el microbio nítrico no se desarrolla. Inversamente, en ellas las bacterias son raras.

Oxidaciones producidas simultáneamente por vía química y por vía microbiana.—Antes de entrar en la descripción de los fenómenos bioquímicos, que dependen de la acción de los microorganismos, conviene aclarar el siguiente punto.

Hemos dicho que los fenómenos de combustión que son la fuente del gas carbónico contenido en el suelo tenían, en realidad, un doble origen. *La combustión de orden puramente químico* es muy poco activa, pero es probable *a priori* que debe aumentar con la temperatura. *La combustión de orden microbiano* es incomparablemente más intensa: esta combustión se acelera igualmente cuando aumenta la temperatura. Pero, es evidente que, más allá de cierta elevación de temperatura, este fenómeno viviente debe retardarse para cesar del todo cuando esta elevación llega á ser incompatible con la vida microbiana.

Dehérain y Demoussy (1896) han probado de definir la parte que corresponde á cada uno de estas dos clases de combustión. He aquí algunos de los resultados á que han llegado estos autores:

Cuando se calientan á 120°, durante una hora en tubos de poco volumen (unos 50 centímetros cúbicos), 25 gramos de tierra franca y 5 gramos de agua, mueren todos los seres vivos. El análisis de los gases, efectuado después de esta calefacción, demuestra que el volumen de ácido carbónico que se ha formado es superior al del oxígeno inicial incluído en el tubo: ha habido, pues, *oxidación de la materia orgánica de la tierra y desdoblamiento simultáneo de cierta cantidad de esta materia;* este desdoblamiento ha suministrado el exceso de ácido carbónico encontrado. Pero esta modificación, en conjunto, es poco profunda; afecta solamente, en uno de los experimentos, á 1,2 por 100 del carbono total de la muestra de tierra.

Si, después de haber extraído los gases, se vuelve á introducir aire y se repite muchas veces la operación de calentar, seguida de la evacuación y de un análisis de los gases, se observa que la oxidación continúa, pero que disminuye en intensidad á medida que se multiplican las operaciones. Así, pues, sólo una pequeña fracción de la materia orgánica se destruye bastante fácilmente bajo la acción del calor. Esta alteración del humus tiene, de hecho, tres fases concomitantes: 1.°, la mayor parte del oxígeno libre quema una porción del carbono de la tierra produciendo gas carbónico; 2.°, una pequeña porción de la materia orgánica da, por desdoblamiento, cierto desprendimiento de gas carbónico; 3.°, hay fijación del resto del oxígeno libre en las materias hidrocarbonadas con formación de agua.

¿Cuál es ahora la intensidad del fenómeno comburente á la temperatura ordinaria, pero en ausencia de microorganismos? Para determinarla, los citados autores emplean un tubo de vidrio, cerrado por uno de sus extremos, que tiene cerca del otro un ensanchamiento. Después de haber introducido en este tubo la tierra húmeda, se pone en la parte ensanchada un poco de algodón y se cierra el tubo, calentándolo luego á 120°. En seguida se extraen los gases formados y se deja entrar aire, el cual se filtra al pasar por el algodón y no se corre así el peligro de infectar el contenido del tubo. Se deja éste á la temperatura ordinaria durante algunos días, y luego se analizan los gases que han permanecido en contacto con la tierra. La oxidación ha continuado, pero la proporción del gas carbónico obtenido no es apenas más que la décima parte de la que daba la calefacción á 120°. Si se repite el experimento (á la temperatura ordinaria), pero empleando tierra no calentada, se obtendrá la resultante de las dos acciones, la química y la microbiana.

La cantidad de carbono que se oxida varía mucho con el estado físico de la tierra, según que esté extendida en capa delgada en el tubo ó se haya comprimido por repetidas sacudidas, según que esté mezclada con agua y amasada en bolitas para imitar la estructura

en terroncitos compactos, según se haya apretado, haciéndola atravesar por una gran cantidad de agua aspirada con una trompa. He aquí la tabla de las cifras obtenidas en un ensayo que demuestran la variabilidad del grado de oxidación en las diversas condiciones enumeradas (50 gramos de tierra y 10 gramos de agua en tubos de 100 centímetros cúbicos de cabida):

	Duración del experimento en días	CO^2 recogido
Tierra extendida	4	16,03 cc.
—	3	11,7 »
Tierra comprimida por sacudidas	3	12,0 »
Tierra en bolitas	4	5,9 »
—	8	12,9 »
Tierra apretada por escurrimiento de agua	4	2,1 »
—	8	3,7 »

La oxidación es, pues, mucho más enérgica cuando el aire penetra fácilmente en la masa. A la temperatura ordinaria, como á 120°, esta oxidación disminuye sin cesar. Dehérain y Demoussy se han asegurado del hecho extrayendo cada vez el gas después de cuatro días de contacto á 22° y substituyéndolo por aire. Al cabo de treinta y cinco días, 50 gramos de una tierra de jardín con el 20 por 100 de agua habían suministrado 58,3 centímetros cúbicos de gas carbónico.

Observemos que la *proporción de humedad más favorable para la oxidación,* cualquiera que sea la causa de ésta, varía de una tierra á otra; en las diversas tierras examinadas aquí, ha variado de 17 á 25 por 100.

Según hemos hecho constar ya muchas veces, la oxidación del humus es imputable á una acción química, siempre débil á la temperatura ordinaria, y á una acción microbiana mucho más intensa. Pero, en ambos casos, la elevación de la temperatura acelera el fenómeno.

Es ahora ocasión de buscar hasta qué temperatura son capaces los microorganismos de quemar el carbono. A la temperatura á que serán destruídos, la proporción del gas carbónico, que aumentaba hasta entonces, debe sufrir una disminución suficiente para que sea posible saber la parte de cada una de las dos acciones á las temperaturas en que entran en juego la una y la otra.

Para ello, se llena de tierra de jardín, rica en humus, un cierto número de tubos dispuestos como antes: uno de los tubos se deja á la temperatura ordinaria (22°), otro se calienta á 44°, otro á 55°, etcétera. La curva adjunta (fig. 9) muestra que, en una tierra de jardín, el desprendimiento del gas carbónico ha aumentado mucho á partir de una temperatura próxima á 45°. A 65° el desprendimiento

ha llegado á su máximo. Se puede afirmar que á esta temperatura la actividad microbiana se ejercía todavía, porque existen fermentos que, en el estiércol, por ejemplo, pueden vivir hasta 75°. A más de 65°, hay una disminución brusca del desprendimiento gaseoso; después, hacia 80°, este desprendimiento vuelve á subir y es considerable á 110°. Por consiguiente, el desprendimiento de gas carbónico resultante de la combustión del humus, aumenta progresivamente hasta una temperatura compatible con la vida (68 á 70° aproximadamente); la disminución del desprendimiento gaseoso, más allá de esta temperatura, indica claramente que la vitalidad es abolida y que sólo entra entonces en juego la acción química.

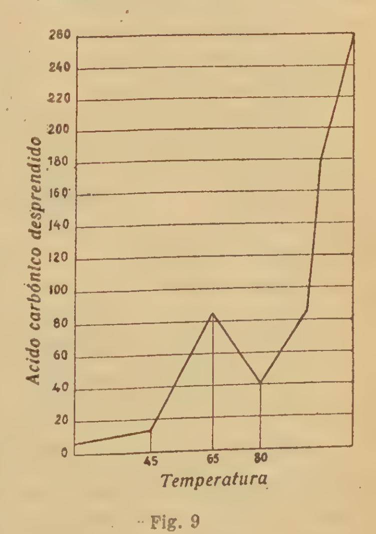


Fig. 9

Orden que debe seguirse en el estudio de los fenómenos biológicos del suelo. — Vamos ahora á pasar revista de los principales fenómenos que, en el suelo, dependen de la actividad de los microorganismos.

Desde el punto de vista de la utilidad que puede sacar la planta, la cual exige para nutrirse la presencia en el suelo de compuestos muy simples, pueden clasificarse los fenómenos microbiológicos en cinco categorías:

1.ª Fenómenos de combustión completa y de desdoblamiento, que transforman el carbono y el hidrógeno en gas carbónico y agua, ó de combustión incompleta con producción de substancias ternarias poco complicadas y desprendimiento de gas carbónico, de hidrógeno, de metano; 2.ª, fenómenos de hidrolisis de la materia nitrogenada compleja con producción de amoníaco; 3.ª, fenómenos de fijación del nitrógeno gaseoso sobre la materia orgánica; 4.ª, fenómenos de oxidación que transforman el amoníaco en los

ácidos nitroso y nítrico; 5.ª, fenómenos de reducción de los nitratos.

Esta última categoría de reacciones biológicas separa de la molécula nitrogenada cierta cantidad de nitrógeno que, recobrando el estado gaseoso, parece perdida para la nutrición de la mayor parte de los vegetales. Pero se recobra el equilibrio por causa de entrar en acción microorganismos fijadores del nitrógeno libre.

No nos extenderemos aquí, fuera de algunos casos especiales, en la morfología y la fisiología de los microorganismos del suelo; esta materia ha sido tratada con toda la autoridad necesaria en un volumen de esta Enciclopedia (1). Sólo consideraremos los resultados obtenidos desde el punto de vista químico.

I

FENÓMENOS DE COMBUSTIÓN Y DE DESDOBLAMIENTO QUE AFECTAN AL CARBONO Y AL HIDRÓGENO

Alimentación de los microorganismos. — Cuando ciertos órganos de la planta, tales como las hojas, caen en otoño al suelo, como ocurre con la mayoría de los vegetales vivaces, ó cuando toda la planta muere donde ha vivido (plantas anuales), los tejidos organizados pasan rápidamente á ser pasto de un gran número de seres microscópicos. Lo mismo sucede respecto de los abonos orgánicos, y especialmente del abono de cuadra, que lleva consigo, cuando es enterrado, una infinidad de especies microscópicas. La eremacausia, esto es, la desaparición lenta del carbono en estado de gas carbónico, del hidrógeno en estado de agua y del nitrógeno en estado de amoníaco, es un fenómeno esencialmente microbiano. Los elementos incombustibles de la planta que formaban parte, en los tejidos vivos, de combinaciones orgánicas más ó menos complejas, recobran el estado mine-

(1) *Microbiologie agricole*, par E. Kayser, 2.ª edición, París, 1910.

ral. Pero, esta desaparición integral de la trama orgánica se efectúa siempre por estadios sucesivos, y la formación de la materia, tan difícil de definir desde el punto de vista químico, que hemos llamado *humus,* es precisamente uno de los términos de tránsito entre la planta que ha cesado de vivir y la gasificación total de sus elementos combustibles. La *humificación* es el resultado de la actividad de un gran número de mucoríneas y de microbios aerobios que habitan en el suelo. Es favorecida, como hemos dicho antes, por una elevación de temperatura, por cierto grado de humedad y por la reacción del medio, porque el humus *ácido*, poblado de seres microscópicos diferentes de los que se encuentran en las tierras de labor ordinarias, más ó menos calcáreas, resiste durante mucho tiempo á la oxidación.

Las mucoríneas y las bacterias encuentran un medio conveniente para su alimentación en el humus. Con el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno, contenidos en el humus, elaboran los elementos ternarios y cuaternarios de su propio organismo. Es imposible, actualmente, definir la materia ó las materias que, en este complejo, constituyen el alimento preferido de tales ó cuales especies microscópicas: es cierto que la mayoría de estas especies pueden ser cultivadas en los medios artificiales que utilizamos en los laboratorios y cuya composición, relativamente simple, difiere mucho de la del medio húmico.

Sea lo que fuere, las infinitamente pequeñas encuentran en la materia orgánica del suelo, por una parte las substancias con que elaboran sus tejidos y, por otra, la energía necesaria para el mantenimiento de su existencia. Por efecto de los fenómenos de desasimilación que se efectúan en estos seres, devuelven al medio ambiente ácido carbónico, agua, amoníaco, nitrógeno: esta desasimilación es para ellos, como para los seres superiores, fuente de calor y de energía.

Los anaerobios concurren igualmente á la simplificación de la materia orgánica, pero las transformaciones que le hacen experimentar conducen á términos más condensados, que contienen todavía cierta cantidad de energía; tales son, entre los cuerpos más comunes y menos complicados, los ácidos butírico, láctico, acético, etc. Los fenómenos anaerobios de la putrefacción propiamente dicha engendran numerosos ácidos amínicos. Entre los gases que se desprenden se encuentra aún el ácido carbónico, á menudo mezclado con hidrógeno, metano y ácido sulfhídrico. Corresponde á los organismos aerobios destruir ulteriormente, de una manera completa,

estas substancias ácidas ternarias ó cuaternarias y hacerlas entrar por oxidación en el mundo mineral en forma de agua, de gas carbónico, de nitrógeno ó de amoníaco.

En el suelo, los microbios aerobios y anaerobios trabajan de una manera concomitante: hasta se observa frecuentemente una suerte de *simbiosis* entre ellos: los primeros, apoderándose del oxígeno de la atmósfera ambiente, protegen así el desarrollo de los segundos. De todos modos, cuando por efecto de circunstancias accidentales las especies anaerobias dominan, la atmósfera interna del suelo queda temporal ó definitivamente privada de oxígeno y no pudiéndose efectuar ya la respiración de las raíces, la planta muere por asfixia.

No debe olvidarse que muchas especies de microbios llamadas anaerobias, son anaerobias facultativas, es decir, que pueden, en un momento dado, vivir como las aerobias en contacto con el oxígeno del aire: sólo entra aquí en juego *la naturaleza del alimento,* según hemos observado ya anteriormente.

Por lo tanto, es por la intervención de los microorganismos que la materia vegetal recobra el estado mineral, y casi exclusivamente á las combustiones microbianas debe atribuirse la presencia, en los suelos, de una proporción mayor ó menor de gas carbónico (pág. 298).

Las especies microscópicas más comunes del suelo que producen estos efectos de destrucción, son *hifomicetos* ú *hongos*, *levaduras* y *bacterias*.

Los *hifomicetos* comprenden principalmente los géneros *Mucor* (sobre todo *M. mucedo)*, *Aspergillus*, *Penicillium;* las levaduras, el género *Torula.* Las bacterias son infinitamente más variadas. Citemos, entre las más comunes: *Micrococcus ureæ*, *Bacillus butyricus (Amylobacter)*, *B. subtilis*, *B. micoides*, *B. prodigiosus*, *B. mesentericus vulgatus*, *B. denitrificans*, *Bacterium coli commune*, *B. termo*, *Bacterium vulgare (Proteus),* bacterias de la nitrificación, etc.

A propósito de los fenómenos biológicos que describiremos luego, recordaremos el nombre de los agentes que los provocan.

Materias no nitrogenadas encontradas en el suelo, procedentes de la actividad microbiana —Entre las materias no nitrogenadas encontradas en el suelo, y cuyo origen debe ser atribuído en gran parte á la presencia de los micro-

organismos, el gas carbónico ocupa ciertamente el primer lugar desde el punto de vista de su importancia. Es inútil volver á tratar de las variaciones de este gas en la atmósfera interna de los suelos; ya la hemos estudiado anteriormente. Su presencia es constante: en efecto, es el producto de la respiración directa de todos los aerobios que viven en la tierra: en cuanto á los anaerobios, emiten este gas por desdoblamiento de ciertas materias ternarias, con desprendimiento simultáneo de hidrógeno ó de metano.

Notemos aquí que se puede observar á veces una producción notable de gas carbónico, independiente de la vida microbiana: esto es lo que ocurre cuando el humus ácido se encuentra en contacto con el calcáreo, aun á 0° (Süchting, 1909). La respiración de las raíces engendra también fuertes proporciones de este gas.

Entre las otras substancias no nitrogenadas encontradas en el suelo, cuyo origen debe buscarse en la actividad de los microorganismos, hay que citar los ácidos fórmico, acético, propiónico, butírico, así como el alcohol (Müntz, 1884).

La presencia de *fermentos butíricos* en la tierra de labor puede ponerse fácilmente de manifiesto mediante el siguiente experimento, debido á Dehérain y Maquenne (1884). En un matraz de dos litros se ponen 60 gramos de tierra de jardín, 60 gramos de azúcar, 30 gramos de carbonato cálcico é indicios de fosfato amónico. Se llena completamente el matraz de agua, se le adapta un tubo de desprendimiento de gases y se calienta á unos 35°. Al cabo de unas quince horas, se desprenden burbujas de gas: después, al cabo de dos ó tres días, la fermentación disminuye. Vuelve á reanudarse si se añade de nuevo cierta cantidad de calcáreo, á fin de saturar el ácido que se ha formado. Los gases que se desprenden son ácido carbónico é hidrógeno; el producto fijo nuevo es el ácido butírico que el calcáreo neutraliza á medida que se va formando. Según los autores citados, es probable que el fermento butírico propiamente dicho, está aquí en menor proporción que el *B. amylobacter*.

Kröber (1909), ha obtenido á la vez ácido acético y ácido butírico sembrando una solución de una mezcla de bacterias del suelo.

Esta formación de ácidos en el suelo puede ser considerada como una causa secundaria de desprendimiento del gas carbónico, por efecto de la neutralización de estos ácidos por el carbono cálcico. *Estos ácidos son enérgicos disolventes de los fosfatos*. Mientras existen en estado de sales, pueden también concurrir á la nutrición

de organismos aerobios que, después de haberlos asimilado, los destruyen por combustión total, formando agua y ácido carbónico.

Destrucción de cuerpos ternarios.—La fermentación de la celulosa es, prácticamente, una de las más importantes. Este hidrato de carbono es destruído frecuentemente por especies anaerobias. Dos reacciones se producen entonces: en la primera hay fijación de una molécula de agua en la celulosa: en la segunda, el hidrato de carbono soluble que se ha formado (¿glucosa?) es transformado en una mezcla de gas carbónico y metano.

La ecuación, por lo demás teórica, de esta fermentación sería la siguiente:

$$C^6H^{10}O^5 + H^2O = C^6H^{12}O^6 = 3CO^2 + 3CH^4$$

Una fermentación semejante debería efectuarse continuamente en el suelo en que abundan los restos celulósicos de los vegetales. Pero, normalmente, la tierra de labor contiene mucho oxígeno y no constituye un medio reductor más que en casos excepcionales. Además, no se encuentran, entre los gases *normales* del suelo, ni metano, ni hidrógeno. De suerte que, si esta fermentación celulósica se efectúa en el suelo, debe ser muy lenta; sufriendo primero la celulosa una humificación que la hace mucho más resistente. También se ha admitido á veces que la fermentación de la celulosa se efectuaba en el siguiente sentido:

$$2C^6H^{10}O^5 = 5CO^2 + 5CH^4 + C^2$$

En realidad, el *carbono* no se pondría en libertad en estado de cuerpo simple, pero las moléculas de carbono restantes se enriquecerían en carbono, y así se podría dar cuenta del mecanismo de la formación de la materia húmica, por fijación del carbono en las substancias ternarias vegetales, con eliminación de agua.

Para explicar la desaparición del metano en el suelo, sería preciso admitir las siguientes transformaciones, de orden puramente químico:

$$CH^4 + CaSO^4 = CaCO^3 + H^2S + H^2O \text{ (Hoppe-Seyler)}$$

O bien:

$$CH^4 + 4Fe^2O^3 = CO^2 + 2H^2O + 8FeO$$

El óxido ferroso se sobreoxida después. Existe en el suelo un microorganismo *(Bacillus methanicus)* que utiliza para su nutrición el carbono del metano. La desaparición del hidrógeno debería

atribuirse también, según algunos autores, á la presencia de microorganismos específicos.

En la fermentación del estiércol en montones se produce, en la parte superior, donde el aire puede penetrar en la masa, una *fermentación aerobia* con formación exclusiva de gas carbónico. En el medio del montón, donde el acceso del oxígeno es difícil, la temperatura se eleva mucho menos que en el primer caso. No pasa apenas de 35 á 40°; puede llegar á 75° cerca de la superficie. A esta elevación de temperatura más débil, corresponde una *fermentación anaerobia*, caracterizada por una producción de gas carbónico y de metano (Reiset-Dehérain). Cuando se la provoca en un recipiente cerrado, la fermentación del estiércol, á 52°, da casi exclusivamente gas carbónico y metano, con formación preponderante de este último gas. Hacia al fin del experimento, la relación entre los volúmenes de estos dos gases se aproxima á la unidad. Al principio de la fermentación, se observa la aparición de un poco de hidrógeno (Schlœsing).

A 72° aun se efectúa la fermentación aerobia; á 52° la fermentación anaerobia es intensa, pero cesa á 66°, esto es, á una temperatura en que aun se realiza la primera. A 55°, Schlœsing ha obtenido unas veces gas de los pantanos (estiércol de vaca), otras veces hidrógeno (estiércol de caballo). En ningún caso se desprende nitrógeno libre: algunos autores han señalado la presencia, en pequeña cantidad, de los ácidos acético y butírico.

La fermentación aerobia actúa sobre las pentosanas; la fermentación anaerobia sobre la celulosa. Se ve, á medida que el estiércol se consume en los estercoleros, que aparecen en sus paredes gotas negras que son el resultado de una humificación análoga, tal vez, á la que se efectúa en el suelo; pero, esta humificación es mucho más rápida en el estiércol. Estas gotas negras han sido frecuentemente consideradas como procedentes de la disolución de la vasculosa de la paja en los líquidos amoniacales.

En medio ácido muchas mucedíneas (aerobias) pueden destruir la celulosa. Notemos en fin que ciertos microbios desnitrificantes atacan á la celulosa: una parte del carbono de esta substancia pasa al estado de gas carbónico, otra parte se une á la base del nitrato para formar un bicarbonato; al mismo tiempo se desprende nitrógeno libre. Volveremos más tarde á ocuparnos en este fenómeno á propósito de la reducción de los nitratos.

En cuanto á los procesos biológicos que conducen á la destrucción de los compuestos *pécticos,* tan comunes en los vegetales, son mal conocidos.

En resumen, todos los aerobios y anaerobios del suelo producen, atacando á la materia orgánica suponiéndola

exenta de nitrógeno, agua y gas carbónico; los anaerobios forman, además, hidrógeno y metano; suministran también productos más condensados, de los cuales los principales son los primeros términos de la serie de los ácidos grasos saturados.

II

FENÓMENOS DE HIDROLISIS DE LA MATERIA NITROGENADA COMPLEJA, PRODUCCIÓN DE AMONÍACO

Acabamos de exponer, en sus grandes líneas, las transformaciones biológicas que sufre el carbono del humus; ocupémonos ahora en las metamorfosis del nitrógeno.

La producción del amoníaco en el suelo es un fenómeno general. — Al estudiar la constitución del humus hemos insistido en el hecho de que la materia orgánica del suelo contenía siempre uno ó más núcleos nitrogenados. Éstos pueden subsistir mucho tiempo en su forma primitiva, como ocurre, por ejemplo, en la turba. Su simplificación es extremadamente lenta; la acidez natural del medio se opone en gran parte al desarrollo de la mayoría de las especies microbianas que concurren más activamente á su destrucción.

La acción de los agentes químicos enérgicos (ácidos fuertes, bases fuertes), nos ha permitido anteriormente (página 289) convertir casi la totalidad del nitrógeno contenido en los complejos nitrogenados, en un cuerpo de constitución muy simple, *el amoníaco*. Un proceso análogo ocurre en la tierra de labor: se encuentra en ella una multitud de microorganismos productores de amoníaco.

Examinemos únicamente aquí la formación del amoníaco.

Un experimento muy sencillo permite darse cuenta de la facilidad con que ciertos organismos del suelo producen grandes cantidades de esta base. Para ello se toma un kilogramo de una buena

tierra de jardín, que se mezcla íntimamente con 100 gramos de materia vegetal pulverizada (por ejemplo, polvo de hojas secas); se pone esta mezcla en una maceta y se riega de vez en cuando. Si se hace el experimento en verano, no se tarda más que tres ó cuatro días en percibir un olor amoniacal marcado, que sale de la maceta. Este ensayo fracasa completamente si se toman materias previamente esterilizadas. Es preciso deducir de esto que la materia vegetal contiene microorganismos capaces de destruir, con producción de amoníaco, una parte de los compuestos nitrogenados que lleva consigo el polvo vegetal. Veremos por otra parte que es ésta una función corriente en la que toman parte las especies microbianas más variadas.

Este trabajo de simplificación debe comprender evidentemente muchas series de reacciones. Se observa, en efecto, en los fenómenos de putrefacción, primero la aparición de ácidos amínicos, como la *leucina*, la *tirosina*, etc., acompañados de *indol* y de *escatol*. Los núcleos de estas substancias resisten bastante bien durante cierto tiempo, pero desaparecen luego con producción de amoníaco.

En un suelo que no ha recibido abonos, como el estiércol, y cuya parte combustible consiste solamente en humus, no parece que ocurran normalmente, á causa de la presencia constante del oxígeno, fenómenos de putrefacción propiamente dicha. El nitrógeno del humus se transforma directamente en amoníaco. De todos modos — y éste es un hecho importante — la descomposición en el suelo de un abono, como el estiércol, debe ir acompañada de la producción de ciertas substancias, unas de existencia sólo temporal, porque son destruídas á su vez por acciones microbianas, y otras cuya duración puede ser á veces bastante larga para perjudicar en ciertos casos á la vegetación. Este problema de la *toxicidad de la tierra de labor y de la fatiga de los suelos*, de que diremos algunas palabras más adelante, considerado como una consecuencia de la presencia de ciertos productos venenosos, dista mucho de estar resuelto.

Los agentes vivos que dan origen al amoníaco se hallan en todos los suelos; atacan, tanto al nitrógeno del humus como al que contienen los abonos orgánicos propiamente dichos.

Fermentos del suelo que actúan sobre el nitrógeno complejo.—Müntz (1899) ha demostrado la presencia de estos fermentos empleando por de pronto tierras ácidas en las cuales no hay nitrificación. Estas tierras, mezcladas con raspaduras de astas, con sangre seca, etc., transforman el

nitrógeno orgánico de estas substancias en amoníaco. El mismo ensayo, efectuado con tierras compactas que nitrifican en general muy difícilmente, ha dado un resultado idéntico: no son, pues, los fermentos nitrificantes los que actúan sobre el nitrógeno orgánico. Veremos más adelante que el fermento nítrico no resiste una temperatura de 70°; sin embargo, una tierra previamente calentada á 90°, y en la cual, por consiguiente, la acción del fermento nítrico está anulada, transforma todavía en amoníaco el nitrógeno de las substancias orgánicas. A 120°, esta transformación cesa: los fermentos productores de amoníaco son, pues, más resistentes que los que oxidan á este amoníaco. Si se vuelve á sembrar con un poco de mantillo la tierra calentada á 120°, la fermentación amoniacal se reanuda.

Esta fermentación es una función esencialmente común en la cual concurren un gran número de especies microbianas que viven en el suelo. Müntz y Coudon (1893) han aislado algunas que son capaces de transformar en amoníaco el nitrógeno orgánico de un caldo de cultivo. Ladureau (1885) ha demostrado que la torulácea que produce esta transformación se encuentra, no sólo en la tierra, sino también en la atmósfera, en las aguas de lluvia, en las aguas subterráneas. Según Marchal (1893), una multitud de bacterias, de levaduras, de mohos, que habitan en las capas superiores del suelo, participan en esta *amonización* del nitrógeno orgánico. En las tierras de labor, la acción de las bacterias predomina á causa de la presencia del calcáreo; en las tierras ácidas intervienen sobre todo las mucedíneas. Por lo que toca á las primeras, el autor citado concede una importancia especial á la presencia de *Bacillus mycoides*. Este bacilo es un oxidante enérgico que fija el oxígeno en el complejo orgánico y produce, á expensas del carbono, gas carbónico; á expensas del azufre, ácido sulfúrico; á expensas del nitrógeno, amoníaco. Obra con la misma energía sobre la albúmina, la caseína, el gluten. Pero, si este bacilo se halla en medios privados de aire donde se encuentran substancias reductibles (nitratos), se comporta como un anaerobio: reduce los nitratos á nitritos; y éstos se convierten finalmente en amoníaco. El *Bacillus mycoides*

engendra, por consiguiente, amoníaco por dos procesos opuestos: ya por oxidación, ya por reducción.

Al lado de este bacilo, actuarían las bacterias siguientes: *Proteus vulgaris*, *Bacterium coli commune*, *B. fluorescens*, *B. liquefaciens*, *B. mesentericus vulgatus*, *Bacillus subtilis*, etc. Este último puede igualmente, por efecto de un fenómeno de reducción, engendrar amoníaco á expensas de los nitratos (Mlle. Fichtenholz, 1899).

Entre las mucedíneas que poseen la función amonificadora, deben citarse el *Mucor racemosus*, los *Aspergillus*, así como una nueva especie, descrita por Müntz y Coudon, el *Fusarium Müntzii*. Estos primeros ensayos han sido confirmados posteriormente por gran número de experimentadores (Remy, 1902, Löhnis y Parr, 1906).

•

Es bien evidente que esta *amonización*, como todo fenómeno biológico, depende de cierto número de factores, tales como la temperatura y la humedad. Si los microorganismos aerobios son poderosos agentes de la fermentación amoniacal, existen también muchos anaerobios que producen el mismo resultado.

La rapidez de la descomposición de los abonos verdes en el suelo depende esencialmente de la edad de la planta y, por consiguiente, de la naturaleza de sus tejidos. Las plantas jóvenes contienen muchas substancias amidadas cuya descomposición, con producción de amoníaco, es relativamente rápida. Cuando la planta es más vieja y sus tejidos contienen sobre todo albuminoides, la amonización es más lenta. Por esta razón es que se entierran los abonos verdes en la época de la florescencia del vegetal, si el suelo es ligero y permeable al aire; si, además, es bastante rico en calcáreo, las condiciones de una descomposición y de una amonización rápidas están realizadas. Cuando se entierran en otoño, el amoníaco formado persiste en el suelo durante el invierno, porque la temperatura es demasiado baja en este período del año para que esta base se oxide y se convierta en ácido nítrico. Pero, en la siguiente primavera, principia esta oxidación y el amoníaco se transforma en ácido nítrico que los vegetales entonces sembrados podrán utilizar (Dehérain).

Entre los agentes artificiales susceptibles de favorecer en el suelo la degradación de la materia nitrogenada con producción de amoníaco, debe citarse la flor de azufre. Esta substancia parece igualmente acelerar la nitrificación (Boullanger y Dujardin, 1912).

Fermentación amoniacal del estiércol.—Esta fermentación es una de las que más interesa conocer desde el punto

de vista de la práctica agrícola. El estiércol es una mezcla de camas y de excrementos. Las camas tienen muy variada composición: generalmente son paja de cereales, hojas de leguminosas ó de patatas, turba, tierra, etc. En las camas yacen los animales y retienen ellas mecánicamente los excrementos sólidos y sobre todo los líquidos.

La orina de los herbívoros contiene urea, ácido hipúrico y algo de ácido úrico. Las dos primeras substancias predominan en la composición de las materias nitrogenadas de la orina. Bastante concentrada en la especie caballuna, la orina es mucho más abundante, pero menos rica en substancias nitrogenadas, á igualdad de volumen, en las especies bovina y porcina. La orina humana y la de los carnívoros es ácida; la de los herbívoros alcalina, á causa de la presencia de bicarbonato potásico. El amoníaco, ó más bien las sales amónicas preexistentes, no se encuentran en una orina normal más que en muy pequeña cantidad. Bajo la influencia de la fermentación amoniacal, las orinas que son naturalmente ácidas, como las del hombre y de los carnívoros, se vuelven alcalinas. Los fermentos que transforman la urea en carbonato amónico, por simple fijación de dos moléculas de agua para una molécula de urea, son bastante numerosos. Se les encuentra en el suelo, en el aire, en las aguas infectas. El *Micrococcus ureæ* encontrado por Pasteur en la orina y estudiado por Van Tieghem, es el primer fermento de la urea que ha sido descubierto. Las bacterias de los géneros *Urococcus*, *Urobacillus*, están asimismo muy esparcidas.

Todos estos microorganismos son aerobios; pueden vivir, sin embargo, en presencia de una escasa cantidad de oxígeno; hidrolizan igualmente el ácido hipúrico. Una molécula de este ácido fija una molécula de agua y se desdobla en una molécula de ácido benzoico y una molécula de glicocola $CH^2(NH^2)CO^2H$. Este último ácido amínico es, á su vez, oxidado con formación de amoníaco.

Esta fermentación amoniacal común es tanto más intensa cuanto más elevada es la temperatura; da al nitrógeno de la orina una forma esencialmente volátil: por esto la pérdida por desprendimiento de amoníaco en el aire es á veces muy notable. Cuando se trata de recoger el estiércol en el establo, se reduce, en cuanto es posible, esta pérdida quitando á menudo las camas sucias, impreg-

nadas de excrementos sólidos y líquidos, y amontonándolas. El riego frecuente del montón con la parte líquida, que escurre poco á poco de la masa, mantiene una fermentación que no debe ser demasiado enérgica, ni desprender demasiado calor, lo que ocasionaría á menudo pérdidas de amoníaco muy importantes. En las condiciones de una fermentación bien regular, el gas carbónico, producido en exceso, es un excelente fijador del amoníaco.

Cuando se aplica el estiércol á una tierra, el amoníaco, ó mejor el carbonato que contiene, es apto para nitrificarse inmediatamente. Si las condiciones de la nitrificación no están realizadas, la base es fijada por el poder absorbente; puede ser, por otra parte, utilizada directamente por los vegetales del mismo modo que el nitrógeno nítrico. De todos modos, debe temerse su causticidad y tomar ciertas precauciones cuando, por ejemplo, se aplica al suelo sólo la parte líquida del estiércol.

Los excrementos sólidos sufren también la fermentación amoniacal, pero con una lentitud incomparablemente mayor que las orinas. En este punto, los excrementos de las especies bovina y porcina, muy acuosos, se descomponen fuera del suelo y en el suelo mucho menos aprisa que los excrementos más secos de la especie caballuna. El calor desprendido en esta transformación varía en razón inversa del grado de hidratación de las materias: ésta es una noción muy importante cuando se trate de aplicar los estiércoles á tal ó cual suelo. Si el suelo es compacto y mal aireado, el estiércol de buey ó de cerdo da nada más que medianos resultados; su empleo debe reservarse á las tierras ligeras y calcáreas, es decir, á las tierras en las cuales la circulación del agua y la del aire son fáciles.

Pero, cualquiera que sea la rapidez de los fenómenos microbianos que mineralizan la masa del estiércol puesta en las condiciones más favorables para esta transformación, no debe olvidarse que la amonización total del nitrógeno de este estiércol es muy lenta. Los excrementos sólidos, como hemos dicho, resisten mucho más que los excrementos líquidos: en cuanto al nitrógeno de las camas, todavía es más refractario.

Conocida es la importancia de estas nociones cuando se trata de evaluar, siquiera aproximadamente, la proporción

de nitrógeno asimilable que lleva al suelo un peso determinado de estiércol.

Veremos, á propósito de los fenómenos de desnitrificación, en qué condiciones el estiércol puede perder cierta cantidad de nitrógeno en estado gaseoso.

Transformaciones del nitrógeno amínico.— Sabemos, por los experimentos que hemos explicado anteriormente (páginas 292 y 293), que el núcleo nitrogenado del humus es un núcleo ó una mezcla de núcleos amidados: el papel de los reactivos enérgicos (ácidos fuertes, álcalis) que hemos empleado para simplificar estas moléculas complejas se reduce, como hemos dicho, á una hidrolisis ó hidratación: de donde deriva la producción de amoníaco. Asimismo, el papel de los microbios amonificantes se reduce á una hidrolisis: esto es especialmente claro en la transformación de la urea en carbonato amónico. Por otra parte, los fenómenos de putrefacción propiamente dicha que se apoderan de una materia albuminoide suministran, en ausencia del aire, derivados nitrogenados más complejos que el amoníaco, que contienen aún en sus moléculas cierta proporción de carbono: ácidos amínicos, indol, escatol, metilamina, etc. La destrucción completa de estos núcleos nitrogenados no puede conducir á una producción de amoníaco más que cuando el carbono y el hidrógeno que contienen sufren una oxidación. Se deduce de esto que, si la hidratación de una amida puede efectuarse en la ausencia del oxígeno y conducir á una producción de amoníaco, es indispensable que un núcleo amínico, RNH^2, experimente una oxidación capaz de convertir el carbono y el hidrógeno del radical (R) en gas carbónico y agua. Tomando como tipo de esta transformación la monometilamina, se tendrá:

$$CH^3NH^2 + O^3 = CO^2 + H^2O + NH^3$$

Una reacción de esta naturaleza debe efectuarse en el suelo; en efecto, el humus puede contener núcleos amínicos, es decir, núcleos que no ceden, en último término, su nitrógeno en forma amoniacal más que cuando han sufrido una oxidación. Además, la fermenta-

ción anaerobia del estiércol engendra ácidos amínicos y aminas cuya destrucción no está asegurada más que por efecto de fenómenos de aerobiosis. Este proceso de amonización por oxidación es muy importante porque tiende, finalmente, á mineralizar el nitrógeno de las substancias nitrogenadas más complejas.

Munro (1886) ha demostrado que, en el suelo, la etilamina se transforma en amoníaco y después en los ácidos nitroso y nítrico. Volviendo á examinar la cuestión, Demoussy (1898) ha comprobado que la tierra vegetal contenía fermentos capaces de transformar en amoníaco el nitrógeno de las aminas. Para ello, introducía 0,01 gr. de sulfato de monometilamina en matraces de cultivo que contenían 100 gr. de agua, 1 gr. de carbonato cálcico y 0,01 gr. de fosfato potásico. Después de esterilización en la autoclave, se siembra en este líquido un poco de tierra de jardín y se calienta a 30°. Al cabo de cuatro días, el reactivo de Nessler indica la presencia del amoníaco; á los ocho días la metilamina ha desaparecido y el nitrógeno ha tomado únicamente la forma amoniacal. Poco á poco, el mismo amoníaco desaparece: es substituído por ácido nitroso y después por ácido nítrico. Esta transformación del nitrógeno amínico en nitrógeno amoniacal *no se efectúa en el vacío;* es tanto más lenta cuanto más difícil es el acceso del aire.

Si se opera con una amina más compleja, la trimetilamina, por ejemplo, debe esperarse más para comprobar la aparición del amoníaco. El día décimoctavo después de la siembra, la transformación no es todavía total; no es completa más que al cabo de mayor tiempo. La presencia del oxígeno también es aquí todavía indispensable. Se puede atribuir este retardo de la amonización á la complexidad de la molécula, por una parte, y á su mayor toxicidad para los microbios del suelo, por otra. La anilina, la piridina, la quinoleína, se oxidan aún más lentamente, y no deben emplearse, para que los experimentos resulten, más que muy pequeñas proporciones de estos cuerpos tóxicos.

Queda, pues, bien demostrado, por los hechos precedentes, que la amonización de estas moléculas complejas es un fenómeno de oxidación, y que la serie de transformaciones de orden biológico que conduce el nitrógeno al estado de amoníaco es tanto más lenta cuanto más condensada es la molécula inicial.

Parecería, según lo que acabamos de decir últimamente, que el amoníaco que se forma de un modo necesario por efecto de la acción de un gran número de especies microbianas, debe abundar en el suelo. Esto estaría en contradicción con lo que hemos dicho algunas páginas atrás (páginas 296 y 363) respecto de la escasez del amoníaco en las condiciones normales en el seno de la tierra de labor. Pero,

según ya hemos hecho notar anteriormente, y como explicaremos mejor á continuación, todo se explica admitiendo que el amoníaco, estadio necesario de la simplificación del nitrógeno complejo, no tiene más que una existencia temporal, y que ciertos fenómenos oxidantes específicos, de orden biológico, intervienen á su vez para transformar esta base en los ácidos nitroso y nítrico, infinitamente más difusibles en el suelo; porque las sales de estos ácidos no son retenidas por el poder absorbente. Esta transformación nítrica es á veces tan rápida que, cuando se realizan ciertas condiciones exteriores, la proporción de amoníaco del suelo no crece nunca.

III

FENÓMENOS DE FIJACIÓN DEL NITRÓGENO GASEOSO

Ciclo del nitrógeno.—Los fenómenos de amonización que acabamos de estudiar afectan á la materia nitrogenada compleja contenida en el humus, debiéndose buscar su origen en los albuminoides que formaban parte de los tejidos de la planta viva. Esta planta habrá tomado el nitrógeno indispensable á su desarrollo de los nitratos del suelo: de manera que el ciclo del nitrógeno, suponiendo que éste una vez entrado en combinación no se desprende nunca en estado de libertad, se manifiesta de la manera siguiente. La planta muerta deja en la superficie del suelo, ó en su interior, sus tejidos cargados de albuminoides. El nitrógeno de éstos, por efecto del trabajo de ciertos microbios, reaparece en forma amoniacal; el amoníaco es luego oxidado con formación de ácido nítrico ó mejor de nitratos, capaces de alimentar nuevas plantas.

Sin embargo, existen causas de destrucción del nitrógeno combinado, y los procesos de la desnitrificación, que estudiaremos más adelante, llevan á la atmósfera cierta cantidad de nitrógeno libre tomado de los nitratos. Sin duda, los fenó-

menos eléctricos que se realizan en la atmósfera restituyen al suelo de un modo continuo, principalmente con las aguas de lluvia, una proporción de nitrógeno combinado que no es despreciable. De todos modos este aprovisionamiento, relativamente escaso en nuestros climas, distaría mucho de explicar, por ejemplo, cómo se enriquecen poco á poco en nitrógeno las tierras en barbecho. Se podría comprender también por qué la mayor parte del nitrógeno contenido en la mayoría de las cosechas es, según Boussingault, superior á la de los abonos aplicados al suelo, y por qué el suelo de los bosques permanece indefinidamente fértil, á pesar de la exportación, á cada corta, de una cantidad de nitrógeno bastante notable. Deben existir, pues, *causas de restitución* capaces de compensar, de sobras, las pérdidas de nitrógeno combinado producidas por ciertas fermentaciones.

Esta cuestión del enriquecimiento del suelo por absorción del nitrógeno gaseoso del aire, ha permanecido durante mucho tiempo muy obscura. La fijación de este gas era negada de una manera absoluta por la mayoría de los experimentadores, á causa de la publicación de la segunda serie de investigaciones emprendidas sobre este tema por Boussingault (1857), aun cuando Georges Ville hubiese obtenido en la misma época resultados absolutamente opuestos.

En el año 1885 Berthelot demostró por vez primera, de modo irrefutable, que el nitrógeno del aire se fijaba en el suelo, y que esta fijación no dependía de un fenómeno puramente químico, sino que era correlativa de la presencia de seres vivos. A partir de este momento abundan los trabajos confirmativos de esta opinión.

Reacciones biológicas que hacen entrar al nitrógeno gaseoso en combinación.—Se puede admitir que se conocen actualmente *tres categorías de reacciones que hacen entrar al nitrógeno libre mineral en la molécula orgánica:* 1.ª, *fijación del nitrógeno en la materia carbonada del suelo por intermedio de variados microorganismos,* desprovistos de clorofila, que actúan solos ó en simbiosis con otras especies; 2.ª, *fijación del nitrógeno en ciertas categorías de vegetales superiores* (leguminosas) por intermedio de un hongo específico que infecta los pelos

de las raíces de la planta; 3.ª, *fijación del nitrógeno por ciertas algas verdes que viven en simbiosis con ciertas bacterias.*

Cualquiera que fuere la naturaleza del fenómeno que *organiza* así al nitrógeno elemental, la cuestión tiene una importancia considerable, tanto desde el punto de vista teórico como en concepto práctico. Teóricamente, porque es notable que el nitrógeno, dotado de afinidades químicas poco enérgicas, entre, por un mecanismo absolutamente desconocido actualmente, en las substancias más complicadas que conocemos, es decir, los albuminoides; desde el punto de vista práctico, porque el nitrógeno es indispensable á la vida vegetal y las causas de pérdida de nitrógeno combinado son notables: pérdidas por combustión viva, pérdidas por desnitrificación en las cuales se desprende en estado gaseoso, pérdidas de nitratos en las aguas de infiltración. Al lado de esta pérdida fatal de nitrógeno combinado, existe una serie de fenómenos biológicos *compensadores* que hacen entrar nuevamente al nitrógeno en el ciclo de la vida, de la misma manera que el gas carbónico, producto de desecho último de toda combustión, recobra en cierto modo una forma viviente cuando ha atravesado la célula clorofílica.

De las tres maneras de fijación del nitrógeno gaseoso que acabamos de enumerar, prescindiremos de las dos últimas, que estudiamos bastante detenidamente en nuestra *Química vegetal*. No recordaremos aquí más que los hechos relativos á la fijación del nitrógeno por intermedio de ciertos organismos desprovistos de clorofila.

Las razones que nos inducen á tratar aquí de la fijación del nitrógeno son las siguientes: este fenómeno conduce á una producción de nitrógeno albuminoide del cual se enriquece el suelo. La mayor parte de las plantas no toman su nitrógeno al suelo más que cuando ha sido transformado, primero en amoníaco y después en ácido nítrico. Los mismos agentes que actúan sobre el nitrógeno complejo del humus y lo metamorfosean en nitrógeno amoniacal, intervienen cuando se trata de amonificar el nitrógeno albuminoide, que es el resultado de la fijación del nitrógeno gaseoso en la materia carbonada. Nos interesa, pues, antes de tratar de esta gran cuestión de la nitrificación, conocer *todas las fuentes de nitrógeno complejo* de que el sol es depósito y de que puede disponer el vegetal.

Investigaciones de Berthelot (1885).—Los suelos con que Berthelot ha operado, para demostrar la fijación del nitrógeno gaseoso, son suelos estériles, muy pobres originariamente en nitrógeno combinado, y que no contenían, al fin de los experimentos, más que de 1 á 3 gramos de materia orgánica por kilogramo.

He aquí, sumariamente indicados, la disposición experimental y los resultados obtenidos. Han sido puestos en observación cuatro suelos: dos arenas arcillosas amarillas, extraídas recientemente del interior de la tierra, pobres en nitrógeno; un caolín en bruto lavado, que contenía 4,8 p. 100 de potasa; una arcilla blanca que contenía 6 p. 100.

Con estas diversas muestras se han hecho cinco series de experimentos: 1.º, conservación de los vasos que contenían las muestras (un kilogramo aproximadamente) en una cámara cerrada: por lo tanto, exclusión de agua de lluvia y de polvos ó de otras materias orgánicas llevadas por una atmósfera ilimitada y renovada sin cesar; 2.º, conservación en vasos encima de un prado y protegidos por una vitrina; 3.º, conservación en vasos en lo alto de una torre de 29 metros, expuestos á las aguas meteóricas y al polvo del aire; 4.º, las muestras estaban contenidas en frascos cerrados de 6 litros, con exclusión, por consiguiente, de recibir nada del exterior; 5.º, las muestras se pusieron en frascos tapados y luego se esterilizaron á la temperatura de 100º, comunicando con el exterior mediante un tubo abierto provisto de algodón: la vitalidad de los microorganismos quedaba suprimida.

He aquí solamente algunas cifras relativas al nitrógeno fijado en estas diferentes condiciones. La arena arcillosa n.º 1, expuesta simplemente al aire en cámara cerrada, contenía al principio, por kilogramo, 0,0709 gr. de nitrógeno. Al cabo de cinco meses, nitrógeno = 0,0933 gr.; al cabo de trece meses y medio, nitrógeno = = 0,1109 gr.; al cabo de diez y siete meses, nitrógeno, = 0,1179 gramos. La ganancia ha sido, pues, de 0,1179 — 0,0709 = 0.0470 gr., ó sea 66 por 100 del nitrógeno inicial. El fenómeno parece retardarse cuando baja la temperatura. En cuanto al nitrógeno nítrico, no representa más que $^1/_5$ del nitrógeno fijado. El aumento no podría ser ilimitado; está subordinado á la cantidad de la materia orgánica contenida en el suelo, cantidad muy pequeña en la muestra ensayada.

Una muestra de arena, análoga á la anterior, expuesta en un prado, ha dado lugar á una fijación de nitrógeno del mismo orden respecto á su valor. En lo alto de la torre la fijación del nitrógeno ha dado cifras parecidas á las precedentes: debe notarse aquí que,

si se determinan al mismo tiempo las cantidades de nitrógeno llevadas por el agua de lluvia, se ve que son mucho menores que las que corresponden al nitrógeno fijado. También es verdad que la pérdida atribuíble á la infiltración de la arena ha sido superior á la ganancia procedente de las aguas meteóricas.

En frascos cerrados, la fijación del nitrógeno se ha efectuado progresivamente como en las demás series: la nitrificación ha sido muy escasa, si no nula: lo que demuestra que este fenómeno no desempeña ningún papel en la fijación del nitrógeno. Como la proporción de materia orgánica era poco notable, el oxígeno de los frascos no ha sido consumido en su totalidad, ni aun al cabo de muchos meses. En la obscuridad parece que el fenómeno fijador es menos intenso que á la luz.

Por último, en la quinta serie de ensayos, en que la muestra puesta en un vaso cerrado había sido esterilizada, no ha habido fijación de nitrógeno. Este aun ha disminuído ligeramente. Esta disminución es probablemente debida á alguna reacción producida, durante la esterilización, por el vapor de agua contenido en la arena en la materia orgánica de ésta: ha habido pérdida de indicios de amoníaco.

En resumen, la fijación del nitrógeno gaseoso debe ser atribuída á ciertos organismos vivientes; esta aptitud es independiente de la nitrificación y no podría ser imputada á la condensación del amoníaco atmosférico. Queda casi suspendida á 0°, desaparece á 100° y se ejerce en vasos cerrados tan bien como al aire libre, en la luz como en la obscuridad. Tales son los primeros experimentos á consecuencia de los cuales está permitido afirmar la realidad de la fijación del nitrógeno gaseoso por el suelo. En una serie de investigaciones ulteriores, Berthelot demostró que esta propiedad de fijar el nitrógeno gaseoso se extendía á un gran número de tierras.

Es superfluo hacer notar la importancia de primer orden de este descubrimiento. Multitud de trabajos confirmativos vinieron á apoyar después las conclusiones de Berthelot. Pero, el objeto principal que se trataba ahora de obtener era buscar en el suelo, y después cultivar, la ó las especies microbianas fijadoras, y ver si esta propiedad notable era común á un gran número de microbios ó de mucedíneas, ó bien si sólo la presentaba un corto número de especies.

Microbios fijadores de nitrógeno libre. — Algunos años después de este primer trabajo, Berthelot (1893) trató de precisar el papel de ciertos microorganismos, aislados del suelo por los métodos ordinarios de la bacteriología. Algunas algas no verdes, de los géneros *Alternaria* y *Gymnoascus*, cultivadas sobre caolín, dieron lugar á una fijación de nitrógeno: lo mismo ocurrió con un cultivo puro de *Aspergillus*. Boussingault, mucho tiempo antes, había deducido de algunos ensayos que había hecho en este sentido, que las plantas inferiores, tales como las mucedíneas, no fijan el nitrógeno gaseoso más que las plantas superiores. Sin embargo, desde esta época, y por consiguiente antes de los trabajos de Berthelot, muchos experimentadores habían seguido admitiendo que ciertas mucedíneas desempeñaban un papel activo en la fijación del nitrógeno gaseoso. Este papel ha sido precisado en estos últimos años, como diremos más tarde.

Las conclusiones de estos primeros trabajos de aislamiento fueron siempre puestos en duda, hasta que Winogradski (1893) aisló del suelo una singular bacteria, capaz de fijar el nitrógeno y cuyas particularidades biológicas merecen ser citadas, no solamente porque este ejemplo es el primer caso bien comprobado de la presencia de una especie microbiana específica, respecto de la fijación del nitrógeno, sino además, porque la bacteria en cuestión, anaerobia, *vive en simbiosis* con ciertos microorganismos del suelo de especie común.

Se puede adelantar que los fijadores de nitrógeno *pertenecen á las categorías de microorganismos:* bacterias anaerobias, bacterias aerobias, hongos. La simbiosis de alguno de estos microorganismos entre sí es frecuente. En un mismo suelo, las tres categorías de seres microscópicos pueden funcionar juntas.

Experiencias de Winogradsky. Fijación del nitrógeno por microbios anaerobios.—Este autor sembró indicios de tierra en el siguiente líquido, absolutamente desprovisto de nitrógeno: agua = 1000 centímetros cúbicos; fosfato bipotásico = 1 gramo; sulfato magnésico = 0,5 gr.; mezcla de cloruro sódico y sulfato ferroso = 0,01 á 0,02 gramos. 100 centímetros cúbicos de este líquido son adicionados de 2 á 4 gramos de glucosa y un poco de calcáreo: por los vasos pasa una corriente de aire filtrado. Después de algunos cultivos, no se encuentran en el medio más que los tres organismos siguientes: 1.º, un *Clostridium* (próximo á los fer-

mentos butíricos) que domina; 2.°, un bacilo muy delgado, de filamentos largos y sinuosos; 3.°, un bacilo grueso, de 2 μ de largo, de filamentos que se transforman en cadenillas de miembros esporogéneos redondeados. El calcáreo se disuelve: se manifiesta una fermentación butírica que consume toda ó parte de la glucosa. El principio de la fermentación es á menudo caprichoso: pero, donde se había efectuado la fermentación butírica, se podía comprobar, sin duda alguna, una fijación de nitrógeno libre.

Á fin de asegurar una marcha más regular al comienzo de la fermentación, Winogradsky añade, desde el principio, á los vasos de cultivo una pequeña cantidad de nitrógeno nítrico ó amónico cuya utilidad pronto veremos. Estos indicios de nitrógeno combinado no influyen en la fijación del nitrógeno gaseoso; sirven solamente para cebar la reacción. En estas circunstancias, ésta se inicia regularmente: para 1 gramo de glucosa destruída en el cultivo, hay fijación de 0,0025 á 0,0030 gr. de nitrógeno. Esta fijación es menor si la aereación es insuficiente, ó cuando la cantidad de nitrógeno combinado añadida al principio es pequeña.

El aislamiento de las especies existentes da ocasión á observaciones muy interesantes. En medio sólido aerobio, el bacilo grueso (bacilo α) y el bacilo delgado (bacilo β) se desarrollan bien; pero el *Clostridium* se niega á desarrollarse. El bacilo α es aerobio, el bacilo β anaerobio facultativo. De sus cultivos no se desprende ningún gas y no se manifiesta ningún olor butírico: su papel, en la fijación del nitrógeno gaseoso, parece ser de orden secundario. El *Clostridium* no puede ser cultivado en medio sólido más *que en el vacío*, donde son incapaces de vivir los bacilos α y β; su cultivo provoca un desprendimiento gaseoso.

Cuando se siembra el *Clostridium* solo en el líquido azucarado primitivo, se produce una fermentación franca, parece que la presencia de los bacilos α y β sea indispensable para su desarrollo; esto es lo que realmente ocurre. Si se reconstituye en el medio azucarado primitivo la asociación de estas tres especies (α, β, *Clostridium*), aparece una fermentación regular, y se debe deducir de ello que un microbio anaerobio,

tal como el *Clostridium*, puede vivir normalmente en un medio azucarado si está resguardado de la acción del oxígeno por microbios aerobios.

Lo que prueba que los bacilos α y β no tienen acción específica, es que se les puede reemplazar por una mucedínea cualquiera (*Aspergillus* o *Penicillium*): la fermentación butírica, con fijación de nitrógeno, se efectúa con igual regularidad que en presencia de los bacilos α y β.

Comprendemos ahora por qué era necesario introducir, desde el principio, en los líquidos de cultivo, indicios de nitrógeno combinado: en efecto, estas especies favorables (bacilos α y β, ó *Aspergillus*, ó *Penicillium*) deben preceder en su desarrollo á la especie anaerobia, puesto que tienen por objeto excluir el oxígeno de la atmósfera ambiente. Y sólo el *Clostridium* es apto para suministrar al medio el nitrógeno combinado; los aerobios α y β son incapaces de ello. Es, pues, indispensable dar primero á estos últimos una alimentación apropiada y poner, por consiguiente, á su disposición indicios de nitrógeno combinado. Una vez está asegurado el desarrollo del *Clostridium*, éste proporcionará á las especies favorables el nitrógeno que necesitan.

Resulta del examen de este curioso caso de *simbiosis* que se puede prescindir de las especies aerobias, cualesquiera que sean, haciendo el cultivo del *Clostridium* en un medio por donde circule únicamente una corriente de nitrógeno puro. Para ello, se introduce un indicio de tierra en un frasco de cultivo donde se hace burbujear día y noche nitrógeno puro; con este primer cultivo se siembra un segundo frasco, y así sucesivamente. Al cabo de 4 ó 5 cultivos en este medio, se calientan á unos 80° durante un cuarto de hora los esporos bien maduros, á fin de destruir los gérmenes extraños.

El *Clostridium* es un verdadero fermento butírico; Winogradsky no ha podido identificarlo con ninguno de los fermentos butíricos actualmente conocidos y ha propuesto llamarlo *Clostridium pastorianum*. En los líquidos de cultivo, suministra ácido butírico y ácido acético, predominando siempre el primero. Los gases que se desprenden consisten en una mezcla de ácido carbónico é hidrógeno.

Parece que la propiedad de fijar el nitrógeno gaseoso corresponde á un corto número solamente de especies microbianas que viven en la tierra de labor; en efecto, contra la opinión de Berthe-

lot, Winogradsky no ha hallado esta propiedad más que en el organismo cuyas particularidades biológicas acabamos de describir. En realidad, desde estas primeras investigaciones y según vamos á ver, muchos experimentadores han puesto en evidencia en el suelo la presencia de numerosas bacterias fijadoras de nitrógeno.

En cuanto á la explicación que debe darse respecto de la fijación del nitrógeno por el *Clostridium* y de la naturaleza de las substancias que se forman en la reacción, Winogradsky admite que el encuentro del nitrógeno gaseoso y el hidrógeno naciente, en el seno del protoplasma viviente, produciría amoníaco.

Fijación del nitrógeno gaseoso durante la humificación.—Entre las causas más activas de la fijación del nitrógeno, debe citarse la *humificación de las hojas muertas* (Henry, 1897). Según los numerosos ensayos de este autor, la ganancia en nitrógeno que experimenta el suelo de los bosques, por efecto de la fijación de este gas en las hojas muertas, es mucho mayor que las pérdidas debidas á la exportación de la madera.

La cubierta de hojas muertas (roble, haya, ojaranzo, álamo, pinos) mezclada con la tierra puede fijar, por año y por hectárea, sobre todo en medio húmedo, unos veinte kilogramos de nitrógeno. Las hojas muertas, puestas en el bosque sobre arena silícea pura, constituyen un medio muy pobre y muy seco y, ó bien no lo enriquecen nada, ó bien no ocasionan más que una ganancia insignificante: pero, no hay pérdida de nitrógeno en estado gaseoso. Montemartini (1906) ha confirmado estos experimentos, sin poder referir esta fijación á una especie microbiana determinada.

Microorganismos anaerobios diversos que fijan el nitrógeno.—Existen muchos anaerobios, próximos al *Clostridium* de Winogradsky, que son capaces de fijar el nitrógeno gaseoso. Por otra parte, este *Clostridium* está muy esparcido en casi todos los suelos; los depósitos de hojas muertas lo contienen (Haselhoff y Bredemann, 1906). Es probable que los enriquecimientos en nitrógeno obtenidos por Henry sean atribuíbles á la presencia de microbios de este género.

H. Pringsheim (1906) ha descrito un *Clostridium (C. Americanum)* que, cultivado en un medio exento de nitrógeno, asimila este gas en frascos abiertos, mientras que el *Clostridium* de Winogradsky exige el concurso de microorganismos aerobios que lo pongan al abrigo del oxígeno. El *C. Americanum* produciría los ácidos láctico, butírico y acético, así como los gases hidrógeno y carbónico. Esta bacteria fijadora de nitrógeno, como la mayoría de

los microorganismos fijadores, encuentra en los cultivos artificiales que contienen glucosa, azúcar de caña, manita, fuentes de energía incomparablemente más eficaces que las que puede encontrar en el suelo. La celulosa, igualmente, sería para estas bacterias una fuente de energía (Pringsheim); pero, estos fijadores de nitrógeno pueden trabajar económicamente en el suelo gracias á la simbiosis que contraen con los organismos autótrofos que les aseguran una cantidad suficiente de materias carbonadas (Krainsky, 1910).

Según Bredemann (1908), las especies descritas con los nombres de *Granulobacter, Clostridium*, etc., deben ser referidas al *Bacillus amylobacter* del cual sólo son variedades.

Microorganismos aerobios que fijan el nitrógeno.— Es bueno recordar por de pronto que Mazé (1897-1898) fué el primero que cultivó en estado de pureza el microbio de las nudosidades de las raíces de las leguminosas en un líquido artificial, y este microbio ha demostrado ser apto para fijar el nitrógeno fuera de toda simbiosis con la planta hospitalaria.

Principalmente á los trabajos de Beijerinck debemos el conocimiento de las especies aerobias fijadoras del nitrógeno en la tierra de labor, de las cuales la principal es el *Azotobacter chroococcum*. Según este autor (1903), este microbio, diplococo de 3 á 5 μ de diámetro, está muy esparcido en el mantillo de jardín y en las tierras fértiles. No existe en las tierras ácidas, pero se le encuentra en el agua del mar (Keding, 1909); en el agua del mar, como en el agua dulce, viviría en simbiosis con ciertas algas. Se le cultiva fácilmente suministrándole fuentes de carbono que asimila con facilidad (manita al 2 por 100; propionato cálcico, sódico, potásico al 0,5 por 100) y que entran poco en fermentación butírica. Este microbio *oligonitrófilo* no forma esporos. Se obtienen hermosos cultivos sembrando de 0,1 á 0,2 gr. de mantillo en el siguiente líquido: agua común, 100 centímetros cúbicos; manita, 2 gramos; fosfato bipotásico, 0,02 gr. Si se añaden á este líquido cantidades algo considerables de nitrógeno combinado, el desarrollo del microorganismo es menor. Al lado de este *Azotobacter*, el autor ha encontrado una segunda especie, el *A. agilis*, que él califica de *mesoaerófilo*.

Según Beijerinck y Van Delden (1903), la fijación del

nitrógeno en los cultivos de *Azotobacter chroococcum* se fundaría en una simbiosis de este microbio, por una parte con bacterias esporógenas del género *Granulobacter* y, por otra, con bacterias sin esporos de las cuales los autores han examinado dos formas: la una es el *Aerobacter aerogenes*, y la otra el *Bacillus radiobacter*, especie muy polimorfa. Todas las especies del género *Granulobacter* tendrían ya por sí mismas el poder de fijar el nitrógeno libre; pero, la simbiosis con el *Azotobacter* exaltaría notablemente esta propiedad. Los cultivos groseros dan una fijación de unos 7 miligramos por gramo de substancia azucarada destruída. El primer producto de la asimilación del nitrógeno existe en el líquido de cultivo *en estado libre*, es decir, fuera de las bacterias que lo forman. Sin embargo, esta afirmación ha sido recientemente puesta en duda: no existiría en los líquidos de cultivo más que muy poco nitrógeno soluble. Por el contrario, la materia seca del *Azotobacter* contendría hasta 80 por 100 de albuminoides (Gerlach y Vogel). Además, el *Azotobacter* sería una de las raras bacterias capaces de engendrar directamente amoníaco á expensas de los nitratos y de los nitritos, pero sin desprendimiento de nitrógeno libre.

Según Gerlach y Vogel, así como según Freudenreich, la simbiosis del *Azotobacter* con las especies mencionadas no es indispensable para que este microbio pueda asimilar el nitrógeno libre. Este hecho ha sido confirmado posteriormente por el mismo Beijerinck (1908). Si se suministra al *Azotobacter* malato cálcico como fuente de carbono, puede fijar 1,5 miligramo de nitrógeno libre por gramo de malato oxidado. La aptitud para la fijación del nitrógeno varía con la edad del microbio: el microbio joven es, respecto de este particular, más activo que el adulto.

Las bacterias fijadoras de nitrógeno son sobre todo activas en medio alcalino, muy poco activas en medio neutro; es posible, de todos modos, que en muchos suelos se encuentren bacterias más activas en medio alcalino, mientras que, en otros suelos, estas bacterias actúan mejor en medio neutro (Fraps, 1904).

El *Azotobacter* se desarrolla muy bien en los suelos encalados, y su difusión depende del grado de basicidad del suelo, es decir, de

su riqueza en calcáreo. Independientemente de la cal del calcáreo. el *Azotobacter* puede utilizar la cal combinada del fosfato bicálcico, ó en combinación con los ácidos láctico y cítrico; pero, no utiliza la cal del fosfato tricálcico, ni la del cloruro ó del sulfato cálcicos. Emplea para su alimentación fosforada los fosfatos sódico ó potásico, así como el fosfato bicálcico; el fosfato tricálcico y los fosfatos de aluminio y de hierro no ejercen acción (Christensen, 1907). Los límites de temperatura entre los cuales manifiesta su actividad son + 5° y + 50°, con un óptimo cerca de 28°. Este microbio es poco sensible á la desecación. La aereación y la mullidura del suelo ejercen una acción especialmente favorable para su desarrollo.

Según Stoklasa, los cultivos de *Azotobacter* contienen 15 por 100 aproximadamente de su peso de nitrógeno, en forma de núcleoproteídos y de lecitinas. La manita, empleada como fuente de carbono, se transforma en alcohol, ácido láctico y ácido acético; á veces se encuentra ácido butírico. Los gases que se desprenden consisten en ácido carbónico acompañado de una pequeña cantidad de hidrógeno. En los cultivos puros, este microbio no daría ácidos, ni alcohol (Krzemieniewski, 1908).

Entre los hidratos de carbono capaces de alimentar al *Azotobacter* deben mencionarse la arabinosa y la xilosa: los *furfuroides* del suelo, esto es, las substancias capaces de desprender *furfurol* en contacto con los ácidos diluídos y calientes, tendrían gran influencia en el desarrollo de este microbio (Stoklasa, 1908). Si el humus natural desempeña un papel importante en la nutrición del *Azotobacter*, no ocurriría lo mismo con el humus artificial que, según Warmbold (1906), quedaría sin ser empleado.

Es completamente necesario que los fijadores de nitrógeno encuentren en el humus natural del suelo las materias carbonadas indispensables para su alimentación; sin embargo, el humus, como hemos dicho anteriormente, no da hidratos de carbono solubles por sacarificación. Los restos celulósicos de los vegetales (fragmentos de raíces, de tallos, de hojas), aun no humificados, constituyen ciertamente un medio nutritivo favorable para los fijadores de nitrógeno. Además, la simbiosis de ciertas algas con las bacterias fijadoras suministra á éstas el carbono que necesitan.

Cuando el humus natural ha sido calentado con ácidos diluídos, capaces de hacerle perder una fuerte proporción de nitrógeno que pasa al estado soluble, este humus es inutilizable como lo sería el humus artificial. Por otra parte, los diversos humus naturales no se comportan de la misma manera respecto del *Azotobacter* (Krzemieniewski).

Según Rémy y Rösing (1911), el *Azotobacter* no se desarrolla bien en las soluciones de manita más que cuando se añade á ellas extracto de tierra. Los ácidos húmicos del suelo determinan una notable fijación de nitrógeno, pero *sólo actúan en razón del hierro que contienen*. Por sí mismos son inertes. ***El hierro posee una***

influencia excitadora y basta la adición de sales férricas para determinar en las soluciones de manita un abundante desarrollo del *Azotobacter* y una considerable acumulación de nitrógeno. Sin embargo, según Kaserer (1911), la presencia del hierro no ejercería más que una débil influencia si no existiesen otras substancias, entre otras la alúmina y la sílice en forma soluble.

Según Löhnis y Westermann (1909), las bacterias fijadoras de nitrógeno podrían reducirse á 4 tipos principales: 1.° El *Azotobacter chroococcum*, caracterizado por el color pardo ó negruzco de las colonias que forma en medios sólidos; 2.°, el *Azotobacter Beijerinckii* (Lipman), caracterizado por una coloración amarillenta y al cual se podría añadir el *Azotobacter vinelandii* (Lipman); 3.°, el *Azotobacter agilis*, especie fluorescente, muy movible: 4.°, el *Azotobacter vitreum*, forma esférica, desprovista de movimiento. A estas cuatro especies debe añadirse una quinta: el *Bacillus danicus*, aerobio.

En principio, casi todos los hidratos de carbono, solubles ó no, glucosa, sacarosa, fécula, así como la manita, constituyen para estos fijadores de nitrógeno una alimentación superior á la que les proporcionan las sales de los ácidos orgánicos.

Por lo que se refiere al nitrógeno fijado en el cuerpo del microbio, este nitrógeno no es directamente asimilable por los vegetales superiores, pero la experiencia enseña que es fácilmente nitrificable.

En cuanto al *Bacillus radiobacter*, se comporta como un desnitrificante. Si en un medio de cultivo apropiado se introducen simultáneamente el *Azotobacter* y el *Radiobacter*, este último reduce el nitrógeno nítrico á nitrógeno libre, el cual entonces es asimilado por el *Azotobacter* (Stoklasa, Stranak).

Con intención no hemos mencionado, en este breve estudio, más que los microorganismos que fijan el nitrógeno de una manera indiscutible. Han sido descritas algunas otras especies ó variedades de los microbios precedentes en las cuales esta aptitud es mínima ó dudosa; nada diremos de ellas.

Aplicaciones prácticas.—En las capas superiores de la tierra de labor es donde el desarrollo de los fijadores de nitró-

geno es más marcado, en razón del mullido, y, por consiguiente, de la aereación que las beneficia á causa de las labores efectuadas con la laya ó con el arado. Además, las algas verdes, tan comunes en la superficie de los suelos, proporcionan fácilmente á los fijadores de nitrógeno el carbono que necesitan en forma de hidratos de carbono con facilidad asimilable. Á esta fuente de carbono debe añadirse la presencia del humus y de los restos vegetales, más abundantes en la superficie que en capas profundas. El papel mejorador del barbecho se encuentra explicado por esto mismo. Se entierra, por medio de una serie de labores, la capa superficial que se ha enriquecido en nitrógeno; queda expuesta al aire una nueva capa, se recubre ésta poco á poco de algas verdes que, á su vez, suministran carbono á una nueva generación de fijadores de nitrógeno. Éstos, por otra parte, se encuentran á veces á grandes profundidades.

Dehérain ha demostrado (1897) que, si se pone en una era plana tierra vegetal que se mantiene con una proporción casi constante de humedad (20 por 100) y se remueve frecuentemente esta tierra, se acelera enormemente la nitrificación del nitrógeno orgánico. Pero, lo que es notable, se favorece también la fijación del nitrógeno gaseoso hasta tal punto que la cantidad de nitrógeno orgánico disminuye mucho menos de lo que aumenta la cantidad del nitrógeno nítrico; el *nitrógeno total* aumenta, pues, en fuertes proporciones (aproximadamente de una cuarta parte en algunas tierras al cabo de quince meses). El citado autor hace notar que el trabajo de los fermentos no tiene gran eficacia más que cuando es continuo: la fijación y la nitrificación de notables cantidades de nitrógeno no se observan más que en las tierras que se substraen á las oscilaciones bruscas de temperatura y de humedad. Si en las condiciones naturales es irrealizable la constancia del primero de estos factores, se puede, por el contrario, por medio de riegos, mantener un suelo en estado de humedad suficiente y aumentar así mucho su fertilidad. Según los ensayos hace poco citados, parece que el nitrógeno recientemente fijado es el que más rápidamente se nitrifica. Conviene mucho, por lo tanto, introducir en el suelo los elementos car-

bonados necesarios para esta fijación, estiércol, abonos verdes, que tienen valor, no sólo por el nitrógeno que llevan, sino también por su materia carbonada, origen del carbono indispensable para los fijadores de nitrógeno.

Es difícil expresar con cifras exactas la cantidad de nitrógeno gaseoso que puede fijarse durante un año en la superficie de una hectárea abandonada al barbecho; las variables de que depende esta fijación son muy numerosas: temperatura, humedad, alcalinidad del suelo, riqueza en elementos minerales favorables, grado de aereación, riqueza en humus, etc. Los números obtenidos oscilan entre 10 y 50 kilogramos; se comprende, después de lo que acabamos de decir, por qué estos números están tan apartados. Pero, sea lo que fuere, el enriquecimiento es de todos modos real, y la creencia de que un suelo bien provisto de materia orgánica gana continuamente en nitrógeno—opinión emitida muy á menudo antes de que se conociera la causa de esta ganancia—está completamente justificada.

¿Se puede, *artificialmente*, influir sobre el suelo, sembrando en él cultivos de bacterias fijadoras, como se ha intentado hacer, con más ó menos éxito, mediante la *nitragina*, en lo que se refiere al cultivo de las leguminosas? Se ha propuesto, á veces, aplicar al suelo soluciones azucaradas para suministrar á los fijadores de nitrógeno un hidrato de carbono fácilmente asimilable. Pero, los cálculos hechos sobre este punto demuestran que el precio de la cantidad de azúcar que se debería emplear sería muy superior al del nitrógeno que se podría aplicar en forma de nitratos ó de sulfato amónico. Además, no se pueden incorporar impunemente al suelo hidratos de carbono solubles: éstos perjudicarían á la vegetación de las plantas superiores y favorecerían el desarrollo de mucedíneas y de bacterias reductoras, capaces de producir fenómenos de desnitrificación. La operación así hecha sería, pues, doblemente mala.

Mucedíneas que fijan el nitrógeno.—Hemos recordado antes (pág. 423) que Berthelot había demostrado que el *Aspergillus niger* determinaba una fijación de nitrógeno. Esta fijación, obtenida por intermedio de diversas mucedíneas, frecuentemente es muy escasa; sin embargo, á veces suministra cantidades no despreciables de nitrógeno; esto es lo que ha comprobado claramente Puriewitsch (1895) respecto de la anterior mucedínea que fija una cantidad de nitrógeno proporcional al peso de la sacarosa puesta á su disposición en el líquido de cultivo. Según Saida (1902), el *Mucor stolonifer* sería igualmente un fijador de nitrógeno; según Fröhlich (1909), lo mismo ocurriría con el *Microsporium commune*, el *Hormodendron cladosporoides*, el *Cladosporium herbarum*, hifomicetos que viven en los restos de las plantas muertas. Heinze (1909) considera esta manera de fijación como frecuentemente dudosa; pero, las mucedí-

neas que se desarrollan muy á menudo en el suelo serían capaces, como las algas, de proporcionar al *Azobacter* los hidratos de carbono que él necesita. Parece, pues, que el papel de fijador de nitrógeno de las mucedíneas, aun muy discutido por muchos experimentadores, exige nuevas investigaciones.

En resumen, si la fijación del nitrógeno gaseoso por las mucedíneas parece dudosa, esta fijación no podría ser negada cuando las diversas especies de *Azobacter* y de *Clostridium* entran en acción. Probablemente se trata aquí de los *Azobacter* que viven en simbiosis con algunas algas verdes esparcidas en la superficie del suelo. Éstas, en *cultivo puro*, no fijan el nitrógeno gaseoso (Kossowitsch, 1894) [véase nuestra *Química vegetal*]. Por otra parte, el bacilo de las nudosidades de las raíces de las leguminosas *(B. radicicola)* trabaja con actividad en fijar el nitrógeno en el cuerpo de esta categoría de vegetales superiores, y sabido es que un suelo que ha alimentado á una ó muchas cosechas de leguminosas experimenta siempre un enriquecimiento más ó menos notable en nitrógeno, por más que haya habido, en cada cosecha, exportación de materia vegetal y, por consiguiente, de nitrógeno. Esta ganancia en nitrógeno que experimenta el suelo á causa del desarrollo de los organismos fijadores está evidentemente compensada por una serie de procesos inversos. La desnitrificación, como también ciertos fenómenos de putrefacción por una parte y las combustiones por otra, restituyen continuamente á la atmósfera una cantidad de nitrógeno gaseoso no despreciable. En qué medida se establece el equilibrio entre las causas de fijación y las causas de liberación del nitrógeno es imposible de apreciar aún siquiera aproximadamente.

Terminaremos este punto mencionando, como recuerdo, una opinión emitida por Bonnema (1903) *sobre la fijación no microbiana* del nitrógeno en el suelo. El nitrógeno libre se oxida en contacto con una solución alcalina de hidrato férrico; en el suelo, este nitrógeno sería probablemente transformado en ácido nitroso por un catalizador que no sería otro que el mismo hidrato férrico. Este, después de haber perdido así una parte de su oxígeno, suministraría hidrato ferroso. Los microbios del género *Azobacter* se apoderarían del ácido nitroso y el oxígeno incluído en el suelo reoxidaría al hidrato ferroso convirtiéndole nuevamente en hidrato férrico. De suerte que

el primer estadio de la fijación del nitrógeno sería puramente mineral. F. Sestini ha refutado esta opinión que no tiene en su apoyo ningún argumento serio.

IV

FENÓMENOS DE OXIDACIÓN QUE TRANSFORMAN EL AMONIACO EN LOS ÁCIDOS NITROSO Y NÍTRICO. NITRIFICACIÓN

Los vegetales, tanto los superiores como los inferiores, podrían utilizar el nitrógeno amoniacal para la formación de sus albuminoides; muchas plantas que se desarrollan en los suelos ácidos se sirven también del nitrógeno orgánico del medio, siendo probablemente digerido este nitrógeno por las micorhizas antes de penetrar en la planta. Sin embargo, la experiencia enseña que el nitrógeno amoniacal y el nitrógeno orgánico, cuando forman parte de un suelo algo calcáreo, experimentan una notable oxidación: *aparece entonces ácido nítrico*, que es neutralizado por el carbonato cálcico. Una multitud de vegetales superiores é inferiores se apodera con avidez de los nitratos para elaborar con ellos la molécula albuminoide. Esta transformación del nitrógeno amoniacal en nitrógeno nítrico constituye el fenómeno de la *nitrificación*. Todas las veces que se realizan ciertas condiciones de medio se efectúa esta transformación; en cierto modo es forzosa.

La nitrificación es un fenómeno de orden biológico, como la fijación del nitrógeno gaseoso; depende de la presencia en el suelo de ciertos microorganismos específicos aerobios que oxidan el amoníaco. Veremos, á continuación, que el microbio nitroso, el primero de estos microorganismos que entra en juego en esta oxidación, no hace actuar el oxígeno más que sobre el amoníaco, siendo incapaz la materia nitrogenada compleja de nitrificarse directamente sin pasar por el término *amoníaco*. El ácido nitroso es oxidado á su vez *por el microbio nítrico*, diferente del microbio nitroso, con producción de ácido nítrico. En suma, *la nitrificación no es una causa de enriquecimiento de los suelos en nitrógeno*, como antes se había creído; sólo es una transformación del nitrógeno amoniacal en nitrógeno

oxidado, siendo este último mucho más difusible puesto que no es retenido en el suelo por el poder absorbente.

El estudio del fenómeno nitrificador es particularmente interesante: desde el punto de vista teórico, dada la manera especial como se nutren los microbios que entran en acción; desde el punto de vista práctico luego, porque el ácido nítrico es muy difusible en los suelos y constituye, para todos los vegetales del gran cultivo, una magnífica fuente de nitrógeno asimilable. Además, la nitrificación es uno de los fenómenos que más eficazmente contribuyen á la purificación de las aguas infestadas. Las circunstancias que provocan ó aceleran la nitrificación tienen, sobre la fertilidad de los suelos, una influencia tan grande como las que favorecen la circulación del aire ó que aseguran á la tierra de labor un grado de humedad conveniente.

El fenómeno nitrificador es conocido desde hace mucho tiempo. Sabido es que, en algunos países cálidos, el *nitro* (generalmente una mezcla de nitratos cálcico y potásico) se efloresce en la superficie del suelo y se mantiene allí mientras no lo disuelve el agua de lluvia. Ciertas tierras de los países tropicales acumulan enormes cantidades de nitro, capaces de permanecer indefinidamente en su sitio gracias á la falta ó á la escasez de lluvias.

Causas de la nitrificación. Historia.—El ácido nítrico que circula en las aguas y el que se encuentra en el seno de la tierra reconocen un doble origen. Las descargas eléctricas de la atmósfera, sobre todo en tiempo de tempestad, combinan el nitrógeno y el oxígeno del aire. En contacto con el vapor de agua este compuesto forma ácido nítrico: de donde deriva la presencia de este ácido en las aguas pluviales y que el suelo reciba cantidades variables de éste principio fertilizante (pág. 86). *Este es el origen mineral del ácido nítrico.*

La segunda fuente de los nitratos debe buscarse, como decíamos antes, en la presencia de ciertos microorganismos específicos muy comunes en la tierra de labor, las aguas corrientes y el polvillo atmosférico. Pero, el papel capital que desempeñan estos microorganismos en la oxidación del amoníaco no fué descubierto hasta 1877. Hasta entonces la formación de los nitratos había sido atribuída á fenómenos puramente químicos.

En lo que ahora vamos á exponer seguiremos un orden histórico: expondremos sucintamente por qué fases ha pasado el estudio del fenómeno nitrificador, cuyo agente viviente ha pasado tanto

tiempo inadvertido, hasta el día en que las ideas de Pasteur, que explicaban de una manera tan luminosa los procesos de la fermentación en general, fueron llevadas al dominio de la química del suelo. Los trabajos que precedieron al descubrimiento del fermento nítrico son muy interesantes examinados de cerca; haremos notar los puntos esenciales.

Se había supuesto primero que el oxígeno y el nitrógeno son capaces, por la acción de los cuerpos porosos, de entrar en combinación: así se explicaba la presencia del nitro en el suelo donde verosímilmente se realizan las mejores condiciones de porosidad, así como la eflorescencia del azufre en los muros de las cuevas, en los escombros y en los montones de materias orgánicas en descomposición. Parece que Glauber (1604-1668) fué el primero que insistió en la papel de los cuerpos porosos y observó que en *las piedras* se forme tanto más salitre cuanto más fácilmente las penetra el aire. A esta influencia de la porosidad substituye más tarde otra opinión: es el nitrógeno de la materia orgánica misma que se oxida á expensas del oxígeno de la atmósfera. También se hicieron esfuerzos para exponer lo más posible esta materia orgánica á la acción oxidante del aire. Los conocidos experimentos de Kühlmann (1838) y de Schönbein (1857)—en los cuales se ve producir ácido nítrico cuando se hace pasar una mezcla de oxígeno y gas amoníaco por la esponja de platino calentada á 300°—parecían indicar que la oxidación del amoníaco debía ser el punto capital en la producción del ácido nítrico.

Por otra parte, es notable observar el papel que se atribuía, en la obtención del salitre, á las substancias animales ó vegetales en descomposición y, esto, en un tiempo en que la ciencia química no existía, por decirlo así. Respecto de este punto, la *Instrucción para el establecimiento de nitrerías*, publicada en 1777 por los Administradores generales de pólvoras y salitres, vale la pena de ser consultada. Se observa en ella con qué precisión los fabricantes de salitre recomiendan mezclar tierra con materias animales ó vegetales y procurar que el aire circule lo más fácilmente posible en la masa, que deberá ser agitada de vez en cuando para conseguir este objeto. La influencia de la humedad tampoco había escapado á los fabricantes de nitro: la materia en nitrificación debía regarse á menudo, ya sea con agua, ya sea y mejor con orines: pero, los riegos debían ser más frecuentes que abundantes. Según la naturaleza de las tierras y de las materias mezcladas con ellas, la nitrificación era más ó menos rápida y el rendimiento en nitro más ó menos elevado.

Conviene observar que estas prescripciones, puramente empíricas, son las que hoy seguimos aún cuando queremos favorecer la nitrificación de una tierra de labor: las frecuentes labores á que se somete el suelo favorecen la entrada y la renovación del aire en la masa, que debe contener cierta proporción de humedad.

En una época bastante próxima á la nuestra se quiso ver en la

nitrificación un fenómeno de oxidación química, provocado por la presencia del óxido férrico, una parte de cuyo oxígeno actuaría sobre el amoníaco para formar ácido nítrico. (Véase antes, pág. 433.) Este concepto del fenómeno nitrificador ha sido sostenido aún en nuestros días; no puede decirse que fuese del todo falso. Pero, en caso de formarse nitratos por este mecanismo, no deben formarse más que en escasas proporciones. Además, muchos experimentadores han operado en condiciones que no están al abrigo de toda crítica, y ningún ensayo cuantitativo serio ha venido á demostrar la realidad de esta génesis del ácido nítrico. Recientemente, Mooser (1901) ha invocado todavía la posibilidad de la oxidación del amoníaco por vía química. Este autor cree que el calentamiento de la tierra destinada á destruir el fenómeno nitrificador no demuestra que esta destrucción sea atribuíble á la muerte de los microbios: la aplicación del calor influiría en el poder catalítico (?) del suelo á causa de una modificación de la superficie.

Trabajos de Boussingault. — Si la esencia misma del fenómeno de la nitrificación fué ignorada por Boussingault, conviene, sin embargo, recordar aquí brevemente algunos experimentos muy interesantes del ilustre agrónomo relativos á este fenómeno, en los cuales se demuestra, entre otras cosas, que el nitrógeno del aire no interviene directamente en la nitrificación.

Boussingault compara la tierra de labor, abonada y trabajada, á una verdadera nitrería: principalmente á expensas del nitrógeno de las materias orgánicas es que se forma el nitrógeno nítrico. Toda tierra, cualquiera que sea su grado de fertilidad, es capaz de nitrificar si contiene calcáreo. Pero, la cuestión que se había suscitado muchas veces, y que Boussingault se propuso renovar, es la posible intervención del nitrógeno del aire en el fenómeno. En efecto, en la tierra vegetal, la nitrificación es primero bastante activa; luego disminuye de intensidad: lo que parece demostrar que el contacto con el aire debe ser suficientemente prolongado para que la materia orgánica se vuelva apta para nitrificar. He aquí las experiencias que hizo Boussingault sobre este asunto.

Se mezcló un peso determinado de tierra vegetal con tres veces este peso de arena cuarzosa, lavada, calcinada y humedecida con agua destilada. Se puso esta mezcla en grandes matraces, que tenían aproximadamente la capacidad de cien litros. La arena tenía por

objeto hacer la tierra más permeable, y la proporción de agua añadida no embebía completamente la masa, circunstancia reconocida favorable á la nitrificación. Se introdujo en uno de los aparatos cierta cantidad de celulosa á fin de ver si, por el hecho de la combustión lenta de una proporción de carbono mayor que la contenida en la tierra, aumentaba la oxidación del nitrógeno. Los matraces, tapados con tapones de caucho, fueron depositados en una bodega. El nitrógeno total, antes y después del experimento, fué determinado por el método de Dumas; el carbono por combustión; el ácido nítrico por medio del procedimiento de la tintura normal de añil. La lentitud de la nitrificación, en estas condiciones, es muy grande y, como la disposición adoptada no permitía agitar la masa, el autor resolvió dejar la tierra en contacto con esta atmósfera limitada, durante un tiempo muy largo. Los matraces, cerrados en 1860, fueron abiertos en 1871.

Al terminar el experimento, Boussingault observó que la atmósfera confinada de los matraces distaba mucho de estar agotada en oxígeno. Pero, en algunos ensayos, en los cuales se habían usado con intención matraces de menores dimensiones para que el oxígeno contenido fuese totalmente empleado en la oxidación de la materia orgánica, la nitrificación no había dado más que cifras que eran la mitad más pequeñas que las de los grandes matraces. En éstos - cosa muy importante, á la que se atendía especialmente en estos ensayos —el nitrógeno gaseoso no pareció haber contribuído á la nitrificación. Porque, al cabo de once años, si la tierra se había nitrificado, el nitrógeno total no pesaba más y ni aún tanto como en 1860. Por lo tanto, en las condiciones en que había sido hecho este experimento, *la nitrificación se había efectuado á expensas del nitrógeno de las substancias orgánicas del humus, que existen en todos los suelos fértiles: el nitrógeno libre de la atmósfera confinada no había intervenido.* He aquí, como información, el resultado de dos experimentos:

Primer experimento: tierra vegetal = 100 gramos, arena = = 300 gramos.

Segundo experimento: tierra vegetal = 100 gramos, arena = = 300 gramos, celulosa = 5 gramos, que contenían 2,222 gramos de carbono.

		Nitrógeno total	Acido nítrico	Nitrógeno contenido en el ácido	Carbono
I	En 1860 .	0,4722 gr.	0,0029 gr.	0,00075 gr.	3,663 gr.
	En 1871 .	0,4520 »	0,6178 »	0,16000 »	3,067 »
	Diferencia	— 0,0202 gr.	+ 0,6149 gr.	+ 0,15925 gr.	— 0,596 gr.
II	En 1860 .	0,4722 gr.	0,0029 gr.	0,00075 gr.	5,885 gr.
	En 1871 .	0,4640 »	0,5620 »	0,14570 »	3,358 »
	Diferencia	— 0,0082 gr.	+ 0,5591 gr.	+ 0,14495 gr.	— 2,527 gr.

Al mismo tiempo, Boussingault, queriendo darse cuenta de los efectos que producen, no sólo la tierra vegetal, sino también sus principales elementos en la nitrificación de las materias orgánicas nitrogenadas empleadas como abonos, efectuó los siguientes ensayos. Se mezclaba un peso conocido de paja, residuos de prensar la semilla de colza, huesos pulverizados, huesos calcinados, raspaduras de cuerno, sangre seca, etc., cuya proporción de nitrógeno era conocida, con arena, con creta ó con tierra vegetal. Una muestra de tierra, no adicionada de abono, servía de término de comparación. Todas estas muestras se introducían en frascos de diez litros de cabida y se humedecían con una cantidad de agua inferior á la que habría sido necesaria para que quedasen embebidas de ella al máximo. Se cerraban los frascos con tapones atravesados cada uno de ellos por un tubo de vidrio destinado á comunicar la atmósfera interior con la exterior. Al cabo de tres años, se humedeció nuevamente la tierra, y dos años más tarde (cinco desde el principio) se procedió al examen del contenido de los frascos. Los abonos mencionados habían sido distribuídos: 1.º, en arena de Fontainebleau lavada y calcinada; 2.º, en creta de Meudon lavada y desecada en la estufa; 3.º, en tierra arcillosilícea muy poco calcárea. Se determinaron, en cada mezcla, terminado el experimento, los nitratos y el amoníaco. He aquí los resultados obtenidos.

En la arena y la creta sólo se habían formado indicios de ácido nítrico ó nada, é indicios de amoníaco; solamente habían nitrificado las substancias *mezcladas con la tierra vegetal*. La tierra vegetal, no adicionada de abonos, también había nitrificado. Se dedujo de los ensayos: en la tierra vegetal, *espontáneamente nitrificable*, es donde las materias orgánicas nitrogenadas produjeron más ácido nítrico y menos amoníaco. Una cantidad de nitrógeno de 30.50 y aun 90 p. 100 del nitrógeno inicial de los abonos se había transformado en ácido nítrico: por lo tanto, *es realmente á la influencia de la tierra vegetal tomada en conjunto que se debe la oxidación del nitrógeno de las materias orgánicas:* no provocan esta oxidación los principales componentes de la tierra, arena y arcilla.

Estos experimentos, muy bien dirigidos por lo demás, no daban ninguna indicación sobre la causa misma del fenómeno. Ponían de manifiesto el hecho de que el nitrógeno atmosférico no entra directamente en juego en la nitrificación, y que la mezcla compleja que constituye la tierra de labor parece poseer ella sola la propiedad misteriosa de producir la oxidación del nitrógeno orgánico, con exclusión de sus principales componentes minerales.

Condiciones de la nitrificación. — El conjunto de las

investigaciones hechas por muchos autores, y por Boussingault en particular, demostraba que, para efectuarse la nitrificación, era indispensable el curso de ciertos agentes. Se debe á Schlœsing (1873) un estudio muy detenido *de las condiciones de la nitrificación;* este estudio ha precedido en algunos años al descubrimiento del ser viviente, productor del ácido nítrico: es muy importante y vamos á presentarlo como un prefacio del conocimiento íntimo del fenómeno nitrificador.

Existen cinco condiciones de la nitrificación: 1.°, presencia de una materia orgánica nitrogenada (tomada evidentemente en su estado natural, porque, en la época en que fué efectuado este trabajo, no se conocía la cuestión de la esterilización); 2.°, presencia de oxígeno; 3.°, presencia de una base capaz de neutralizar al ácido nítrico; 4.°, presencia de cierta proporción de humedad; 5.°, temperatura comprendida entre ciertos límites.

1.° *Presencia de una materia orgánica nitrogenada.*—Cuando se mezclan á pesos iguales de arena cantidades crecientes de mantillo, las cantidades de ácido nítrico formadas son proporcionales al peso de la materia orgánica empleada. La variabilidad de la nitrificación de una tierra respecto de otra depende, en gran parte, de la naturaleza de la materia orgánica que nitrifica y de su grado de descomposición.

2.° *Presencia del oxígeno.*—Se toman pesos iguales de una misma tierra y se ponen en una serie de alargaderas, por las cuales se hacen circular mezclas de nitrógeno y oxígeno en proporciones variables. He aquí los resultados obtenidos por el autor citado:

Mezclas gaseosas que contenían por 100	Oxígeno . . .	1,5	6	11	16	21
	Nitrógeno . .	98,5	94	89	84	79
Acido nítrico formado en un kilogramo de tierra con 15 por 100 de agua al cabo de 4 meses (en miligramos):		45,7	95,7	131,5	162,6	246,6

La actividad de la nitrificación está, pues, en relación directa con la proporción de oxígeno que contiene la atmósfera

de las alargaderas. El caso de una atmósfera sobreoxigenada no ha sido examinado, porque este caso está fuera de las condiciones naturales.

Schlœsing ha hecho una serie de experimentos en la cual no hizo circular más *que nitrógeno puro*. No sólo no se han formado nitratos, sino que han sido destruídos los preexistentes. Volveremos más tarde á este importante fenómeno reductor.

3.° *Presencia de una base.*—Boussingault, hace mucho tiempo, había insistido ya en el hecho de que las materias nitrogenadas deben, para nitrificar, hallarse en contacto con carbonatos alcalinos, cálcicos ó magnésicos. Schlœsing ha demostrado que, cuando está en combinación con el gas carbónico en exceso, la cal se halla en el mejor estado para la nitrificación. A fin de variar las proporciones de bicarbonato, el autor hacía pasar, en las diferentes muestras de tierra, aire más ó menos rico en ácido carbónico: la proporción del bicarbonato disuelto varía en el mismo sentido que este ácido. Basta que exista en muy pequeñas cantidades más allá de las cuales el fenómeno nitrificador ya no aumenta:

Proporción de CO^2 por 100 en la mezcla de las alargaderas		0	1,3	3,5	9
Acido nítrico con un kilogramo de tierra (en miligramos)	al principio	174	174	174	174
	al fin (2 meses)	360	422	421	425
Ganancia de ácido nítrico		+ 196	+ 248	+ 247	+ 251

4.° *Presencia de cierta proporción de humedad.*—La cantidad de ácido nítrico formada crece con la proporción de humedad de la tierra: el fenómeno presenta su máxima intensidad cuando la tierra está embebida al máximo, pero bien escurrida:

Proporción de agua por 100 de tierra	9,3	14,6	16	20
Acido nítrico formado en un kilogramo de tierra durante 1 mes de verano (en miligramos)	157	172	397	478

5.° *Temperatura.*—La nitrificación es nula á 5°, cesa á 57°; su máximo es á unos 37°.

Schlœsing demuestra, además, que la adición á la tierra de ciertas sales, tales como sulfatos, cloruros, nitratos, no ejerce influencia alguna sobre el fenómeno nitrificador, aun cuando se exagerasen intencionadamente sus proporciones. El desmoronamiento del suelo ejerce una influencia favorable y la nitrificación recobra nueva actividad cada vez que se remueve el suelo.

Tales son las condiciones indispensables para que se efectúe el fenómeno de la nitrificación. Estudiaremos ahora la causa de este fenómeno.

La nitrificación es correlativa de la presencia de un ser vivo. Trabajos de Schlœsing y Müntz.—Debemos á Schlœsing y Müntz (1877) la siguiente noción: *la nitrificación es correlativa de la presencia de un ser vivo.* Este ser vivo es un microorganismo aerobio que estos sabios no han aislado en estado de absoluta pureza, porque en esa época los estudios bacteriológicos estaban todavía poco adelantados, sobre todo por lo que toca al suelo, pero cuya realidad han demostrado mediante una serie de experimentos muy notables y cuyas propiedades más características han estudiado. He aquí la exposición de estas investigaciones:

Pasteur, en 1862, había hecho observar que la acción del oxígeno del aire sobre la materia orgánica es singularmente limitada cada vez que esta acción se ejerce en ausencia de microorganismos. Muchos seres inferiores poseen, por el contrario, el poder de fijar el oxígeno en las materias orgánicas complejas cuyos elementos son transformados así en agua, gas carbónico, nitrógeno, amoníaco, ácido nítrico.

En la misma época en que Schlœsing y Müntz hicieron sus primeros ensayos, la cuestión de la purificación de las aguas de las cloacas por el suelo era objeto de profundos estudios. Estos sabios se preguntaron si la combustión de la materia orgánica no se efectuaba más que en la sola tierra vegetal (como resultaba de los trabajos de Boussingault) ó bien si esta combustión podía realizarse en suelos exclusivamente arenosos, desprovistos de materia orgánica.

En un tubo de 1 metro de longitud, cerrado en su extremo inferior por una tela metálica, se introdujeron 5 kilogramos de arena cuarzosa calcinada al rojo y mezclada con 100 gramos de calcáreo

pulverizado. Esta tierra era regada cada día con una proporción constante de agua de las cloacas, calculada de manera que el descenso se efectuase en ocho días. A fin de realizar todas las condiciones de la nitrificación, se hacía circular por el tubo una corriente lenta de aire, introducida por presión de arriba abajo. Durante los primeros veinte días, no hubo nitrificación: el agua escurrida simplemente se había filtrado y contenía una proporción invariable de amoníaco. Pasado este tiempo, apareció el ácido nítrico, y poco á poco desaparecieron el amoníaco y el nitrógeno orgánico. Schlœsing y Müntz hacen notar que, si se hubiese tratado de un simple fenómeno de combustión, no se comprendería por qué había exigido tanto tiempo esta combustión. Pero, por el contrario, se comprende muy bien este retraso si se admite *la presencia de un ser organizado* cuyo desarrollo y cuya actividad comburente han requerido cierto tiempo antes de manifestarse. He aquí cómo estos autores se han asegurado de la presencia de este ser organizado en las aguas de cloaca empleadas.

Algunos años antes, Müntz había demostrado que los organismos vivos, en general, son anestesiados por los vapores de cloroformo y que sus funciones quedan suspendidas. En la parte superior del gran tubo se pone un pequeño recipiente que contiene cloroformo, cuyos vapores son arrastrados por la corriente de aire y se esparcen poco á poco en toda la columna. Diez días después de esta operación, las aguas que filtraban ya no contenían ácido nítrico, mientras que reaparecían el amoníaco y el nitrógeno orgánico. La prueba de la presencia de un ser vivo capaz de quemar el nitrógeno amoniacal quedaba pues hecha.

Schlœsing y Müntz aplicaron el mismo tratamiento á la tierra vegetal. Se llenan de tierra dos alargaderas y se hace pasar por ellas una corriente de aire; en la segunda se pone un recipiente con cloroformo. Al cabo de dos meses, la proporción del ácido nítrico en ésta no había variado; en la primera, la nitrificación había seguido su curso normal. Si se hace el mismo experimento, pero calentando previamente á 100° una de las alargaderas, y se hace pasar luego á través de estos dos aparatos aire calentado con una llama, á fin de no introducir gérmenes procedentes del exterior, se observa que la nitrificación queda estacionaria en la alargadera calentada y que prosigue en la que contiene tierra natural.

La *porosidad* de la masa no parece desempeñar un papel tan importante como el que antes se le atribuía. En efecto, si se ponen en alargaderas cascajo ó guijarros lisos, cuerpos no porosos, y se les rocía con aguas de cloaca, éstas nitrifican muy bien. Si se hace burbujear una corriente de aire en agua de cloacas, puesta en un frasco con un poco de creta, esta agua nitrifica y desaparece el amoníaco. Tierra vegetal ó mantillo, puestos en suspensión en agua, siguen nitrificando cuando se hace pasar una corriente de aire por la mezcla.

Primeros ensayos de aislamiento del microbio nitrificador. —Schlœsing y Müntz sembraron con indicios de mantillo, ya en agua de cloaca esterilizada, ya en líquidos minerales artificiales que contenían una sal amónica y una materia orgánica. Se hace pasar por estos líquidos una corriente de aire, ó bien se extienden en capa delgada, al abrigo del polvo, y se mantienen á una temperatura conveniente. En estas condiciones el nitrógeno amónico se oxida poco á poco. A 70° la acción del fermento queda anulada; lo mismo ocurre cuando se suprime el acceso del oxígeno. Dichos autores han encontrado este fermento principalmente en la tierra vegetal, las aguas de las cloacas y todas las aguas que contienen materias orgánicas; las aguas corrientes tambien lo contienen. Se le ha encontrado posteriormente en las aguas del mar.

Si el microbio nitrificador no ha sido aislado en estado de pureza á consecuencia de estos primeros ensayos, sin embargo no se puede dudar de su presencia y de la notable propiedad que tiene de oxidar el amoníaco.

Pero, los infinitamente pequeños que oxidan la materia orgánica en general son muy numerosos, y había motivo de preguntar si la nitrificación era una función común de oxidación que podía ser efectuada por una mucedínea aerobia cualquiera, ó bien si la oxidación del amoníaco estaba reservada solamente á microorganismos específicos. Schlœsing y Müntz demostraron que las mucedíneas de las especies *Mucor mucedo*, *M. racemosus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium glaucum*, *Mycoderma vini*, *Mycoderma aceti*, puestas en las condiciones más favorables para la nitrificación, no tenían ninguna acción sobre la oxidación del amoníaco. Estas mucedíneas, lejos de producir nitratos, los destruyen y transforman el nitrógeno nítrico en nitrógeno orgánico. Si se abandona el experimento á sí mismo durante cierto tiempo, hasta puede producirse un desprendimiento de nitrógeno gaseoso. La función nitrificante aparece, pues, como una función *específica* de que sólo ciertos microorganismos están dotados.

Particularidades del fenómeno nitrificador. — Apenas fueron publicadas estas interesantes investigaciones, muchos experimentadores se apresuraron á comprobar su exactitud y en continuar el estudio detenido de la oxidación del amoníaco. Warington (1879) confirma la necesidad de una siembra, así como de la presencia de una base. Hace notar que, en las soluciones artificiales concentradas, el período de incubación es más largo que en las soluciones diluídas; además, se forma, unas veces ácido nítrico, cuando los líquidos son fríos, diluídos y están en la obscuridad, y

otras veces ácido nitroso, cuando los líquidos son más concentrados y están expuestos á la humedad y sometidos á una elevación de temperatura. Por otra parte, la formación del ácido nitroso había sido considerada ya por Schlœsing y Müntz como la consecuencia de una nitrificación dificultada. Sin embargo, en los ensayos de Warington, la formación del ácido nitroso no parece depender de una falta de oxígeno: los nitritos parecen preceder á los nitratos; á veces no se formaba ácido nitroso. Una solución de nitrito potásico, inoxidable por el aire solo, se convierte en nitrato si se le añaden algunas gotas de un líquido en plena nitrificación. Por último, Warington demostró que nunca la totalidad del nitrógeno del amoníaco era capaz de nitrificar, porque una parte de este nitrógeno sirve de alimento á los mismos microbios y pasa al estado de nitrógeno orgánico.

Todos estos experimentos confirman, pues, los trabajos de Schlœsing y Müntz.

Irregularidades observadas en los primeros ensayos de cultivo.—Entre los hechos de difícil explicación notados por Warington durante la nitrificación de las soluciones amónicas, debe citarse ante todo el siguiente. Puesto que la nitrificación es obra de un ser vivo, éste debe encontrar en el medio donde se desarrolla una materia carbonada á expensas de la cual pueda vivir, como ocurre con todos los seres desprovistos de clorofila. Pues bien, Warington había citado muchos ejemplos en los cuales demostraba que la nitrificación podía producirse en medios extremadamente pobres en substancias carbonadas. Poco después, Munro (1886) insistía en el siguiente punto: que los menores indicios de carbono, como los llevados por el polvillo atmosférico, bastan para determinar la transformación en ácido nítrico de cantidades relativamente grandes de amoníaco.

Heræus (1886), hacia la misma época, en un estudio de las especies microscópicas que viven en las aguas de fuente, había observado que las bacterias dotadas de la propiedad de oxidar al amoníaco, que se encuentran en un líquido adicionado de tierra, no se desarrollan más que en la superficie y no parecen tener á su dis-

posición más que muy poca materia carbonada. Este autor tomó de la superficie de estos líquidos una pequeña cantidad de los seres que allí se habían desarrollado y los sembró en dos líquidos: el primero contenía fosfato potásico, sulfato magnésico, cloruro cálcico, carbonato amónico y azúcar, el segundo contenía las mismas substancias, menos el azúcar. La oxidación del amoníaco fué mucho más intensa en el segundo que en el primero de estos medios. Herœus observa que es difícil comprender cómo un ser desprovisto de clorofila puede vivir en un medio exento de carbono orgánico. Muchos otros experimentadores habían, casi al mismo tiempo, hecho una observación análoga (Warington, Hueppe, P y G. Frankland). Hueppe (1888) y Löw han tratado de explicar esta síntesis de materia carbonada por medio de fórmulas muy hipotéticas que es inútil transcribir aquí.

Un segundo hecho, á propósito del cual ya hemos dicho antes dos palabras, tampoco tenía explicación. Warington, Munro, P. y G. Frankland habían observado muy á menudo que, en sus líquidos de cultivo, se formaban unas veces nitritos y otras nitratos. En algunas ocasiones estos últimos eran reducidos á nitritos. Este fenómeno reductor podía ser atribuído á la presencia de diversos microbios que vivían en el suelo y en las aguas. La presencia de una materia orgánica, capaz de fermentar fácilmente, parecía ser la causa esencial de esta reducción. Pero, lo que parecía extraño era la formación casi constante de nitratos en las soluciones artificiales, mientras que, en el suelo, esta formación es rara, á menos que se esté en presencia de un medio francamente reductor, como en el caso de los suelos sumergidos, ó que la tierra haya recibido grandes proporciones de una sal amónica.

Munro fué el primero en emitir la idea de que el ácido nitroso puede ser producido por un organismo especial, diferente del que convierte el nitrógeno amónico en nitrógeno nítrico.

Trabajos de Winogradsky.—Si es evidente, según lo que antecede, que la nitrificación es un fenómeno biológico, subsisten, sin embargo, aún muchas incertidumbres sobre la manera de oxidación del nitrógeno orgánico. Esta oxidación, con formación de nitratos, ¿es obra de un solo microorganismo ó de muchos? ¿Cómo se alimentan estos microorganismos que parecen desarrollarse tanto mejor cuanto más pobre en carbono es el medio en que se cultivan?

Se debe á Winogradsky (1890-92) una respuesta satisfactoria á estas dos cuestiones fundamentales. A causa del gran interés que ofrece el trabajo de este autor, haremos aquí algunas aclaraciones especiales.

Principiemos por el estudio de la oxidación del nitrógeno;

el de la nutrición carbonada de los microbios será expuesto más adelante.

Después de muchos ensayos infructuosos, que le demostraron la dificultad de obtener una nitrificación regular en medios que contenían una materia orgánica, el sabio bacteriólogo ruso sembró una gota de un líquido en plena nitrificación *en una solución puramente mineral,* que contenía en 100 centímetros cúbicos: 1 gramo de sulfato amónico y 1 gramo de fosfato potásico. Cada matraz recibe 100 centímetros cúbicos de esta solución, á la cual se añaden de 0,5 gr. á 1 gr. de carbonato magnésico. Desde el cuarto día la reacción de la difenilamina es muy clara (esta reacción indica del mismo modo la presencia de los nitritos que la de los nitratos). Al cabo de muchos meses, cuando el medio estaba poblado de un modo constante, el autor aisló del líquido cinco especies, que se desarrollaban en la gelatina: ninguna era capaz de oxidar el nitrógeno amoniacal. Este procedimiento de aislamiento en la gelatina era, pues, impropio para poner de manifiesto el organismo nitrificador, cuando la siguiente observación descubrió su presencia y, á la vez, hizo sospechar un modo especial de alimentación carbonada. En el fondo de los matraces de cultivo, cuando la nitrificación era intensa (al quinto ó al sexto día), la capa de carbonato de magnesio se removía, y esto era debido á organismos ovales, fusiformes, que se movían con rapidez en el líquido. Esta coincidencia, entre la aparición de los organismos móviles y una nitrificación intensa, era la regla: en cuanto á los organismos móviles, parecía que en un momento dado desapareciesen del líquido, porque el velo superior que recubría el cultivo no los contenía. En los cultivos antiguos, el depósito de carbonato se volvía agrisado y gelatinoso: si se imprimía un movimiento á los matraces, este carbonato permanecía primero como aprisionado; después la masa se disgregaba y se dispersaban copos en el seno del líquido. Examinados al microscopio, estos copos dieron el resultado siguiente: los grumos transparentes de la sal estaban recubiertos de una bacteria oval, parecida á la que nadaba en la solución en el momento en que ésta se enturbiaba. La adición

de un poco de ácido acético disolvía el carbonato, los copos perdían su blancura, se volvían transparentes conservando su forma y aparecían con el aspecto de una *zooglea,* poco compacta, presentando huecos: éstos señalaban el sitio donde el carbonato magnésico había sido disuelto por el ácido acético.

Este conjunto producía la impresión, no de una mezcla accidental del microbio con el carbonato, *sino de una asociación de la bacteria con la sal,* englobada en una materia gelatinosa, que esta bacteria había segregado. Se comprende ahora el retardo, y aun á veces la ausencia, de la nitrificación en los experimentos del principio. En efecto, se tomaba una gota del líquido *en la superficie* del líquido en vía de nitrificación, donde no existe más que raramente la bacteria oval. Para efectuar una siembra segura es preciso introducir la pipeta *hasta el fondo del matraz,* en la misma capa del carbonato.

Resulta de esta primera serie de minuciosas investigaciones que, á lo menos es ya muy verosímil que el microbio nitrificador se contente con una alimentación puramente mineral: esta conclusión se confirmará aún más á continuación. A fin de purificar el cultivo y de aislar de este medio únicamente el microbio nitrificador, Winogradsky recurrió á un procedimiento muy ingenioso que vale la pena de ser citado. Para ello se utiliza precisamente la facultad que posee este microbio de no desarrollarse en la gelatina. Se vierten en agua destilada esterilizada algunas gotas de líquido tomadas del fondo de un matraz, como se acaba de decir. Se vuelven á tomar los grumos con una pipeta y se les deja caer en gelatina, contenida en una cápsula de Pétri. En el mismo sitio en que caen estas gotas, quedan, después de la absorción del líquido por la gelatina, algunas partículas de carbonato magnésico: al cabo de algunos días, se examina al microscopio el residuo dejado por estas gotas. Los residuos que no presentan colonias son introducidos nuevamente en el líquido mineral esterilizado: se obtienen de este modo cultivos puros, que nitrifican muy regularmente, pero que al principio trabajan á veces con bastante lentitud, porque el microbio ha debido sufrir á causa de su prolongado contacto con la gelatina.

El empleo de un medio de cultivo *estrictamente mineral* se imponía, pues. Winogradsky dializa una solución de silicato sódico mezclada con ácido clorhídrico: la solución de sílice, que queda en el dializador, se concentra, luego se vierte en cápsulas Pétri y se gelatiniza mediante la adición de un líquido mineral, que contiene en

100 centímetros cúbicos de agua: 0,04 gr. de sulfato amónico, 0,05 gr. de sulfato magnésico, 0,1 gr. de fosfato potásico, de 0,6 á 0,9 gr. de carbonato sódico é indicios de cloruro cálcico. Así se podrá aislar en seguida el microbio nitrificador, introduciendo directamente una partícula de tierra vegetal en la gelatina de sílice. Este procedimiento, muy recomendable, es el que más se sigue hoy ordinariamente.

Poder nitrificador.—El microbio así aislado se presenta en forma de una elipse, cuyo diámetro mayor tiene una longitud de 1,1 á 1,8 μ, y cuyo diámetro menor es de 0,9 á 1 μ. Winogradsky le dió por de pronto el nombre genérico de *Nitromonas*. Comparó su poder nitrificante con el que había obtenido Schlœsing en sus estudios sobre la nitrificación del amoníaco (para 200 gramos de tierra se habían nitrificado de 3 á 4 miligramos de nitrógeno por día) y encontró cifras algo superiores (6 á 7 miligramos).

Formación exclusiva de ácido nitroso. — Examinando de más cerca *la naturaleza del compuesto oxigenado del nitrógeno*, que se había formado en sus cultivos, Winogradsky observó *la presencia casi exclusiva de nitritos*. Un hecho semejante había sido señalado ya anteriormente, como hemos dicho antes: esta formación exclusiva de nitritos había sido atribuída á una nitrificación dificultada, ya á causa de una disminución de temperatura, ya por efecto de demasiada alcalinidad del medio, ó bien por aereación insuficiente ó á consecuencia de fenómenos reductores. Pero, en los presentes experimentos, no se podía dar la culpa á nada más que á la insuficiencia de la aereación. Pues bien, si se pone el líquido de cultivo en matraces más anchos y en capas más delgadas, para favorecer la oxidación, no se consigue más que una producción más intensa de ácido nitroso: el ácido nítrico no aparece.

Volviendo á la idea primitiva de Munro, según la cual la nitrificación podría depender del concurso de dos microorganismos distintos, de los cuales el uno produjese el ácido nitroso y el otro el ácido nítrico, Winogradsky se proporcionó muestras de las más variadas tierras y, en vez de proceder al aislamiento inmediato de los orga-

nismos especiales, por pasos sucesivos en líquidos que contuviesen una sal amónica, resolvió dejar desarrollar libremente todos los seres capaces de vivir en el medio de cultivo puramente mineral hasta aquí utilizado. El período de incubación varió de tres á veinte días, según la muestra de tierra empleada. Primero se formaba ácido nitroso; paulatinamente éste disminuía y se veía aparecer el ácido nítrico. Los organismos nitrificadores, transportados directamente de su medio natural á un medio fácilmente nitrificable (que contenía una sal amónica), producen, pues, *por de pronto ácido nitroso*, y el ácido nítrico no se presenta más que cuando el amoníaco ha desaparecido totalmente. Se deduce de esto que la producción del ácido nitroso constituye un *estadio intermedio* entre el amoníaco inicial y el último término de la oxidación, el ácido nítrico. Si se quiere que el ácido nitroso primero formado se oxide más rápidamente, se deberán añadir al líquido proporciones crecientes de una sal amónica, no á medida que desaparece del líquido el nitrógeno amónico, sino á medida que desaparece el nitrógeno nitroso. Se puede también acelerar esta transformación hasta tal punto, que no se encuentre ya el nitrógeno nitroso, y que la oxidación parezca producir ya en seguida el nitrógeno nítrico. Resulta, pues, que, en un medio líquido, es posible producir nitrógeno nítrico, tal como ocurre en los medios naturales.

Fermento nítrico.— *La oxidación del amoníaco es, pues, el resultado de la actividad de dos microorganismos distintos*. En efecto, Winogradsky ha demostrado de la manera más precisa que el fermento nitroso, aislado por cultivos sucesivos al principio de sus investigaciones, era incapaz de producir otra cosa que ácido nitroso. Al cabo de muchas semanas los cultivos no contenían más que el ácido nitroso. Este fermento nitroso, llamado por Winogradsky *Nitrosomonas* (fermentos del mundo antiguo) y *Nitrosococcus* (fermentos del mundo nuevo), ha sido encontrado en todas las tierras donde se le ha buscado. Su función biológica es siempre específica: desde el punto de vista morfológico, sufre variaciones importantes, de donde derivan los dos nombres que le ha dado el autor.

La formación de ácido nítrico, por oxidación del ácido nitroso, es también una *función específica* debida á un microorganismo especial. Si se toman tierras, en las cuales se haya observado una enérgica nitrificación, y se siembran indicios de ellas en medios que no contienen amoníaco, *sino única-*

mente nitrito potásico, se consigue, más ó menos pronto, pero siempre, la transformación del nitrito en nitrato. De esto deduce Winogradsky que, para que haya producción de nitratos, debe mantenerse apartado el fermento nitroso. Se obtiene un cultivo puro del fermente nítrico *(Nitromonas, Nitrobacter)* introduciendo una partícula de tierra en vía de nitrificación en un líquido que no contenga más que nitrito potásico. Se purificará el fermento sembrando algunas gotas de este líquido en un nuevo medio de nitrito y así sucesivamente.

La función de este último microorganismo es específica: porque si, con un cultivo purificado de este microbio, se siembra un líquido amónico, no se producen ni nitrito, ni nitrato. El microbio nítrico es incapaz de oxidar al nitrógeno amónico. Es un fermento extremadamente pequeño: su diámetro medio es de 0,5 μ. Se le puede también aislar en estado de pureza en sílice gelatinizada.

Nitrificación en la tierra de labor.—¿Qué ocurre en el medio natural en que se efectúa la nitrificación, es decir, en la tierra de labor? Winogradsky esteriliza cierto número de muestras de tierra, que reciben un poco de sulfato amónico y que se humedecen con una proporción suficiente de agua. En una primera muestra se introduce fermento nitroso puro, en una segunda fermento nítrico puro, en una tercera los dos fermentos juntos. Una muestra de tierra testigo, no esterilizada, permite seguir los progresos de una nitrificación natural.

He aquí lo que se observa: 1.º, la tierra normal no da más que nitratos, los nitritos sólo tienen una existencia pasajera. Aun en presencia de cantidades notables de una sal amónica, la oxidación de los nitritos por el fermento nítrico no es dificultada: resulta de esto que, en el suelo, el fenómeno nitrificador difiere absolutamente del que se efectúa en una solución artificial donde la presencia del amoníaco en exceso anula la oxidación de los nitritos por el fermento nítrico; 2.º, el fermento nitroso no produce en la tierra preparada como se ha dicho antes, más que el ácido nitroso, y éste no

se oxida nunca; 3.º, el fermento nítrico solo no oxida al amoníaco; 4.º, la introducción de los dos fermentos produce ácido nítrico, y las cosas ocurren como en la muestra de tierra testigo.

La substitución en el líquido de cultivo del sulfato amónico por fosfato, especialmente favorable á la vida microbiana, no ejerce influencia propicia en la fermentación nitrosa: tal vez la transformación de los nitritos en nitratos es entonces acelerada (Marcille, 1896).

Energía comparada de los fermentos nitroso y nítrico.—Hemos visto que, en los medios líquidos, se formaban sobre todo nitritos: desde el principio de los estudios precisos emprendidos sobre la nitrificación este hecho parecía general. Munro había expuesto que el ácido nitroso tal vez era el resultado de la actividad de un organismo especial, ó bien que, en presencia de carbono orgánico, el microbio nitrificador mismo dirigía de preferencia el oxígeno al carbono, más bien que el ácido nitroso.

He aquí, según Winogradsky, cómo puede explicarse la aparición constante de los nitritos en los líquidos de cultivo. Cuando existen los dos microbios, el más enérgico dificulta y anula el desarrollo del otro. Pues bien, según este sabio, la vitalidad del microbio nitroso es incomparablemente mayor que la del microbio nítrico. En condiciones idénticas, el primero oxida mucho más pronto una cierta proporción de nitrógeno amoniacal que el segundo oxida la misma proporción de nitrógeno nitroso. Si, pues, en un líquido que contiene una sal amónica, se siembran juntos los dos fermentos, el microbio nitroso es el único que encuentra, desde el principio, las condiciones favorables para su desarrollo, y cuando el fermento nítrico puede principiar su trabajo, en el momento en que se halla en presencia de los nitritos que acaban de formarse, el fermento nitroso es tan abundante que se apodera de todo el oxígeno disuelto en el líquido y aniquila así poco á poco la función oxidante del fermento nítrico. Al cabo de algunos pases por soluciones amónicas, el fermento nítrico, cada vez más debilitado, acaba por desaparecer. Sin embargo, Winogradsky ha observado, á veces, una persistencia de este

último fermento (por ejemplo, en una tierra procedente de Quito): lo que prueba que la vitalidad del microbio nítrico puede ser, en ciertos casos, igual y aun superior á la del microbio nitroso.

¿Por qué, en la tierra de labor, la aparición del ácido nitroso es seguida tan rápidamente de la del ácido nítrico? La tierra es un medio poroso, y la superficie que presenta al oxígeno ambiente es mucho mayor que la de un líquido que no está en contacto directo con el aire más que por su parte superior. Por esto el desarrollo del fermento nitroso no puede perjudicar al del fermento nítrico. No hay, pues, acumulación de nitritos en el suelo, á no ser que se encuentren realizadas condiciones de aereación desfavorables, como las que resultan de la sumersión. La producción de nitritos se observa igualmente en el caso en que el suelo reciba proporciones exageradas, ó repetidas demasiado á menudo, de sales amoniacales. También debe notarse que, en el suelo, la transformación del nitrógeno orgánico en nitrógeno amónico es lenta, y que normalmente no hay nunca exceso de amoníaco. Este es oxidado por el fermento nitroso á medida que se va formando, y la vitalidad de este último fermento es proporcional á las débiles proporciones de amoníaco que encuentra. El fermento nítrico puede, pues, actuar simultáneamente y oxidar al nitrógeno nitroso.

También es posible, como ha demostrado Demoussy (1899), obtener directamente ácido nítrico en los medios líquidos. Para ello conviene preparar un medio que contenga los dos fermentos nitroso y nítrico, en el cual este último sea muy activo. Se siembran con indicios de tierra soluciones de nitrito potásico, que contienen un poco de fosfato potásico y de carbonato cálcico. La transformación de 20 miligramos de nitrógeno nitroso en nitrógeno nítrico requiere, en estas condiciones, quince días. Entonces se añadió una cantidad igual de nitrito: su oxidación se efectuó en cuatro días, después en tres: lo que prueba que el microbio nítrico era especialmente vigoroso en este medio. Se introdujeron entonces 20 miligramos de nitrógeno en forma de sulfato amónico: al cabo de dos semanas, la reacción del amoníaco era nula, y en ningún momento se pudo descubrir en el líquido la presencia de nitritos. Una nueva proporción de amoníaco fué oxidada en cuatro días, después en tres, y esto sin que apareciese nitrógeno nitroso.

La ausencia del ácido nitroso en las condiciones naturales de la nitrificación, opuesta á la constante presencia de este ácido en los experimentos artificiales, ha sido, más recientemente, objeto de un interesante trabajo de Boullanger y Massol (1904). Los medios naturales líquidos que nitrifican no

contienen, en general, según estos autores, 200 miligramos de amoníaco por litro, proporción que se opone á la multiplicación del fermento nítrico. No se llega á esta proporción ó no se pasa de ella más que en algunas aguas de cloaca muy impuras. Desde el principio, el fermento nítrico puede, por lo tanto, desarrollarse al lado del fermento nitroso. Cuando la *simbiosis* entre los dos microbios está bien establecida, la producción del ácido nítrico no cesa, aun en los casos en que la proporción de amoníaco se eleve, sin alcanzar, sin embargo, á enormes cantidades, que nunca se encuentran en la práctica.

Ciclo completo de la oxidación del nitrógeno.—Los fermentos nitroso y nítrico no pueden, en ningún caso, oxidar directamente la molécula nitrogenada compleja tal como la contenida en el suelo; ¿es necesario que esta molécula nitrogenada sufra primero la fermentación amoniacal?

Oméliansky (1899) ha resuelto el problema de un modo muy satisfactorio de la manera siguiente: Si se ponen los fermentos nitroso y nítrico bien puros en presencia de urea, de asparagina, de caldo, de clara de huevo, etc., estas substancias siguen intactas: el nitrógeno orgánico no es oxidado por ninguno de estos fermentos, aislados ó asociados. Por otra parte, el autor toma caldo diluído y lo siembra: 1.º, con el *Bacillus racemosus*, acompañado de los fermentos nitroso y nítrico; 2.º, con el *B. racemosus*, acompañado de fermento nitroso; 3.º, con el *B. racemosus*, acompañado de fermento nítrico; 4.º, con los fermentos nitroso y nítrico solos. En el primer caso, se percibe pronto un olor pútrido y después amoniacal. Al cabo de tres semanas, aparece el ácido nitroso; á los dos meses, no hay más que ácido nítrico. En el segundo caso ocurre lo mismo que en el primero, pero el ácido nitroso persiste indefinidamente sin que, en ningún momento, haya producción de ácido nítrico. En el tercer caso, solamente se forma amoníaco y éste no se oxida; en el cuarto caso, el caldo no sufre ninguna transformación.

Resulta, pues, que, cuando el nitrógeno orgánico se transforma en nitrógeno nítrico, como ocurre en todas las buenas

tierras de labor, *es indispensable el concurso de tres suertes de microorganismos:* 1.º, el *nitrógeno orgánico* sufre una fermentación que le convierte en amoníaco, resultando esta transformación de la presencia de especies comunes (pág. 412) que no tienen nada de específicas; 2.º, el *nitrógeno amoniacal* es oxidado, convirtiéndose en nitrógeno nitroso por un microbio especial que, de un sitio á otro, puede presentar diferencias morfológicas, pero cuya función es absolutamente específica y que no puede llegar más allá del estadio nitroso; 3.º, el *nitrógeno nitroso*, á su vez, es oxidado y convertido en ácido nítrico por un microbio específico, bien distinto del precedente, incapaz por sí solo de oxidar al nitrógeno amoniacal.

Tales son las diferentes fases por que pasa el fenómeno nitrificador cuyo mecanismo ahora conocemos, gracias á los trabajos de Winogradsky. Justo es añadir que, en la misma época en que éste publicaba sus investigaciones definitivas (1891), Warington llegaba, por su parte, y de un modo del todo independiente, á conclusiones análogas.

Expondremos más adelante la serie de trabajos hechos sobre la nitrificación é indicaremos algunas particularidades relativas á la nutrición de los fermentos que acabamos de estudiar. Pero, antes, conviene hablar de la manera cómo los microbios nitrificantes toman su carbono del mundo exterior.

Nutrición carbonada de los microbios nitrificadores. —Esta manera de nutrir es de las más notables. Hemos visto anteriormente (pág. 445) que algunos experimentadores, Heræus entre otros, habían sido sorprendidos por el hecho de que la nitrificación es generalmente tanto más activa cuanto menos materia carbonada existe en los líquidos de cultivo ó en las aguas en vía de nitrificación. Esto parecía sorprendente porque los microbios nitrificadores están desprovistos de clorofila. Á fin de establecer de una manera indiscutible esta propiedad, única en su género, Winogradsky puso el mayor cuidado en preparar medios rigurosamente exentos de materias orgánicas y sales minerales absolutamente puras, y en proteger los cultivos de todo vestigio de polvillo atmosférico. Observó entonces que el fermento nitroso, organismo incoloro, puede, tanto á la luz como en la

obscuridad, desarrollarse en un medio absolutamente exento de carbono orgánico. Este hecho quedó fuera de duda gracias á determinaciones del carbono efectuadas en los líquidos en cuyo seno se había desarrollado la nitrosomonada.

Estas determinaciones, en las cuales no insistiremos, se efectúan quemando el carbono que se ha fijado en los líquidos de cultivo por medio de una mezcla de bicromato potásico y ácido sulfúrico (página 356). He aquí algunas cifras: Una solución en que se habían formado 928 miligramos de nitrógeno oxidado, ha dado 10,2 miligramos de carbono; otra que contenía 604 miligramos de nitrógeno oxidado, ha suministrado 7,1 miligramos de carbono. Este carbono no representa ciertamente el carbono total asimilado, porque durante los cultivos se ha perdido cierta cantidad por oxidación (respiración).

Así, el organismo nitrificador proporciona el primer ejemplo de un microbio incoloro, susceptible de síntesis carbonada. Winogradsky supone que se trata aquí de la síntesis de una amida cualquiera á expensas del gas carbónico y del amoníaco.

La asimilación del carbono no se efectúa más que á medida que avanza la oxidación del nitrógeno; los máximos y mínimos de asimilación carbonada coinciden con los máximos y los mínimos de oxidación del nitrógeno. Cuatro experimentos han dado los siguientes resultados (en miligramos):

Nitrógeno oxidado	722	506,1	928,3	815,4
Carbono	19,7	15,2	26,4	21,4
Relación $\frac{\text{nitrógeno}}{\text{carbono}}$	36,6	33,3	35,2	36

La lentitud con que aumenta el fermento nítrico se explica considerando la desproporción que existe entre su acción oxidante y su poder asimilador: la asimilación de 1 miligramo de carbono no se efectúa más que cuando hay, por término medio, formación de 35,1 miligramos de nitrógeno oxidado. Según Coleman (1908), la relación entre el nitrógeno oxidado y el carbono asimilado parece ser mayor para el microbio nítrico que para el microbio nitroso.

Las precauciones y el cuidado que hay que tener en la purificación de las substancias minerales que sirven para demostrar la fijación del carbono y en la de los gases que están en contacto con los líquidos de cultivo, deben ser extremadamente minuciosas. Elfving (1891) ha demostrado, en efecto, que algunos hongos (*Briarara*), son capaces de utilizar como fuente de carbono los vapores de ácido acético, bastante frecuentes en los laboratorios.

Experimentos de Godlewski.—Está, pues, bien demostrado que la nitrosomonada asimila en los líquidos en que

se desarrolla el carbono de los carbonatos minerales. Sin embargo, Godlewski (1893) emitió la idea de que este carbono no podía ser tomado *más que del ácido carbónico del aire ó del de los carbonatos fácilmente disociables*. Este autor demostró (1896) que una solución amónica sembrada de *nitrosomonadas* no suministra ácido nitroso cuando se hace pasar por el matraz de cultivo aire bien exento de gas carbónico, aun cuando la solución nutritiva contenga carbonato magnésico.

Á fin de que esta demostración fuese más rigurosa, Godlewski se valió de aparatos cuyas piezas eran todas ellas de vidrio, y en su fabricación se excluyó el corcho cuya oxidación podía dar indicios de ácido carbónico. Las conclusiones que se dedujeron de las investigaciones así emprendidas fueron las siguientes: no hay oxidación del amoníaco en ausencia del gas carbónico; por el contrario, si este último se encuentra en contacto con los líquidos de cultivo, la nitrificación es regular. *Resulta de esto que el gas carbónico libre es la sola fuente de donde la nitrosomonada toma carbono.* Pero, la proporción inicial de este gas puede ser extremadamente pequeña, porque, á medida que se oxida el amoníaco, se produce ácido nitroso. Este ácido descompone el carbonato magnésico y desprende gas carbónico, el cual puede, por otra parte, quedar fijado en el carbonato, formando así un bicarbonato fácilmente soluble. Estas conclusiones han sido confirmadas por Gaertner (1898).

Es con todo difícil comprender que un microbio que fija tan fácilmente el oxígeno en el amoníaco posea al mismo tiempo un poder reductor bastante enérgico para descomponer el ácido carbónico.

Debe observarse igualmente que, según Godlewski, una fracción generalmente bastante pequeña del nitrógeno amoniacal se desprende en estado libre durante la nitrificación en medios artificiales. En sus experimentos ya antiguos, Schlœsing había demostrado que la cantidad de nitrógeno libre que aparece en la nitrificación del amoníaco, en el seno de una tierra bien aireada, es casi despreciable. En realidad, una pequeña fracción, ya sea del amoníaco preexistente, ya sea del ácido nítrico formado, es empleada para la producción de cierta cantidad de nitrógeno orgánico.

Parece, después de lo que antecede, que la presencia de la materia orgánica sea un obstáculo para el desarrollo de los fermentos nitrificadores, y, sin embargo, la nitrificación, á veces muy intensa en los suelos, se efectúa siempre en presencia del humus. Examinaremos pronto especialmente este importante punto.

Algunos nuevos datos sobre los fermentos nitrificadores.—Numerosos experimentadores se han ocupado en los notables trabajos de Winogradsky; éstos han quedado incólumes en sus conclusiones fundamentales. Sin embargo, desde veinte años han sido dados á conocer algunos hechos interesantes que requieren una descripción sumaria.

La dificultad, tan grande en un principio, de aislar las bacterias nitrificantes en estado de pureza había hecho suponer á, algunos autores que el carbono orgánico podía serles de alguna utilidad. Burri y Stützer (1896) pensaban haber aislado un microbio nítrico capaz de desarrollarse en gelatina. Stützer y Hartleb, confirmando en gran parte los trabajos de Winogradsky, creían que el microbio nítrico podía transformarse en hongo. Pero, este último autor (1896), sometiendo sus propios ensayos á una nueva comprobación, observó que al lado del microbio nítrico se encuentran muy á menudo organismos, morfológicamente próximos, pero incapaces de oxidar al nitrógeno nitroso. Estos se desarrollan bien en gelatina ó en caldo nutritivo, mientras que el verdadero microbio nítrico no se desarrolla en tales medios: ningún organismo nitrificador puede vivir en gelatina. El empleo de cultivos impuros es aquí la fuente de los errores. Esta opinión ha sido confirmada poco después por Fraenkel, Krüger y Rullmann.

Según Omélìansky (1899), si se puede emplear con éxito la sílice gelatinizada que contenga una sal amónica para aislar el microbio nitroso, y la gelosa nitritada para aislar el microbio nítrico, es aún preferible aislar el microbio nitroso en placas de yeso. A una solución que contiene por litro 0,8 gramos de sulfato magnésico, 2 gramos de sulfato amónico, 2 gramos de sal marina, 0,4 gramos de sulfato ferroso, 2 gramos de fosfato bipotásico, se le mezcla carbonato magnésico y se impregnan placas de yeso: ó bien se malaxa yeso con 10 por 100 de carbonato magnésico y agua. Después de tomada la substancia se moja la placa con la solución precedente. Perotti (1905) emplea cubos de carbonato magnésico que humedece con una solución apropiada.

Debe hacerse aquí una observación importante de Oméliansky: este autor ha demostrado (1902) que el microbio nitroso no parece segregar *diastasa oxidante* á que podría atribuirse la oxidación del amoníaco, y que *su presencia efectiva* es indispensable para la marcha regular del fenómeno nitrificador. Si, en las soluciones nutritivas, se substituye la sal ferrosa por una sal manganosa, no se consigue mejora alguna.

Influencia de una adición de materia orgánica en la nitrificación.—Examinemos si hay motivo, respecto de los microbios nitrificadores, *para hacer una suerte de clasifica-*

ción entre las materias orgánicas. La completa ausencia de toda substancia orgánica no es una condición absolutamente indispensable para la buena marcha de la nitrificación. Winogradsky y Oméliansky (1899) mismos han demostrado que, si la presencia de peptonas en ciertas proporciones dificulta y hasta anula la función específica del microbio nítrico, no ocurre lo mismo con todos los cuerpos carbonados. En presencia de una siembra abundante, la peptona puede favorecer la fermentación nítrica en las proporciones de 0,025 á 0,2 gramos por 100. La glucosa, en la proporción de 0,025 gramos por 100, obra favorablemente, pero una proporción de 0,03 gramos por 100 parece ser el límite de esta acción favorable. La urea, en la proporción de 0,05 á 0,04 gramos por 100, activa la fermentación si la siembra no es muy abundante; la retarda en proporciones superiores á 0,5 gramos. La asparagina, en la proporción de 0,05 gramos por 100, es desfavorable; lo mismo ocurre con la glicerina. Substancias orgánicas más complejas, como la infusión de heno ó de hojas secas, pueden ser útiles dentro de ciertas proporciones y perjudicar en proporciones mayores. La orina, en una concentración de 2 por 100, posee una acción retardatriz atribuíble al amoníaco que se forma durante la esterilización. Warington ya había hecho ver que la presencia de este álcali dificulta la transformación de los nitritos en nitratos. Si el acetato sódico al 2 por 100 retarda la transformación del ácido nitroso en ácido nítrico, el butirato, por el contrario, tiene poca acción en este concepto. El microbio nitroso es más sensible que el microbio nítrico respecto de substancias nitrogenadas, tales como la peptona y la asparagina. Cuanto más compleja es la molécula de un cuerpo dado, más descomponible y más asimilable es para la mayoría de las especies microbianas y más fácilmente retarda el desarrollo y paraliza el trabajo de los microbios nitrificadores. Warington había demostrado, mucho tiempo antes (1891), que una adición de 0,25 gramos por 100 de acetato cálcico á un cultivo en vía de nitrificación favorecía el fenómeno.

Añadamos que Stützer (1901) ha confirmado la mayor parte de las ideas de Winogradsky y Oméliansky relativamente al retardo ó

al paro que experimenta la fermentación nítrica en presencia de ciertas substancias orgánicas. También debe observarse que una substancia carbonada puede ser perjudicial cuando se halla en un líquido artificial de cultivo donde no existan otros seres vivos que los microbios nitroso y nítrico, mientras que en el suelo, medio natural, esta substancia no ejerce acción alguna. Wimmer (1904), lo mismo que Coleman, han hecho ver que la acción nociva del azúcar de caña ó la de las sales de ácidos orgánicos era mucho menor en el suelo que en las soluciones artificiales. Grandes proporciones de abonos orgánicos (estiércoles), aplicadas á una tierra de labor, pueden suspender la nitrificación y ocasionar fenómenos de reducción con pérdida de nitrógeno libre. Pero, el humus natural, aun cuando abunde, no dificulta la nitrificación: acelera la marcha del fenómeno, porque **constituye la fuente primordial del nitrógeno de los suelos. Volveremos á tratar de este asunto.**

Según Karpinski y Niklewski (1908), el extracto de tierra y los humatos son particularmente favorables á la nitrificación: tal es también la opinión de Bazarewski (1909).

Influencia del humus en la nitrificación.—Veamos en fin qué es lo que da, respecto de la nitrificación, la materia orgánica del suelo. Esta materia posee una constitución muy distinta de la de sus generadores (celulosa, albuminoides de los vegetales). Era evidente, *a priori*, que su presencia habitual pero en cantidades variables en la tierra no podía dañar á la evolución del fenómeno nitrificador. Según Müntz y Lainé (1906), la forma misma que afecta el carbono en el humus no es un obstáculo para la nitrificación. He aquí los resultados que estos autores han obtenido añadiendo á muchas tierras suficientemente calcáreas, y muy desigualmente ricas en carbono, una proporción de 1 por 1000 de sulfato amónico:

		Tierra de jardín	Mantillo consumido	Tierra silíceo-calcárea	Tierra arcillosa	Tierra arcillo-calcárea
Riqueza por 100 de las tierras en carbono		3,8	17,6	1,5	1,0	1,5
Nitrógeno nitrificado por kilogramo de tierra en . . .	2 días.	0,036 gr.	0,117 gr.	0,000 gr.	0,009 gr.	0,005 gr.
	7 días.	0,090 gr.	0,209 gr.	0,037 gr.	0,040 gr.	0,020 gr.
Nitrógeno nitrificado por kilogramo de tierra adicionada de 2 por 100 de $SO^4(NH^4)^2$ en . .	7 días.	0,282 gr.	0,411 gr.	0,007 gr.	0,661 gr.	0,064 gr.

Se ve. en estas cifras, que la nitrificación se efectúa tanto mejor cuanto más abundante es la materia carbonada del suelo: la abundancia del humus favorece, pues, la nitrificación, pero no es indispensable para una nitrificación activa. En efecto, si en el ensayo anterior se desarrolla una nitrificación continua por la adición de sulfato amónico, hasta el establecimiento de un régimen normal, se encuentra al cabo de 32 días:

Nitrógeno nitrificado por kilogramo de tierra . .	0,743 gr.	1,346 gr.	0,653 gr.	0,906 gr.	0,871 gr.

Es claro que las tierras más pobres en humus producen nitratos con una actividad que no difiere mucho de la de las tierras más ricas; á veces la nitrificación de las tierras pobres sobrepuja á la de estas últimas. *La diferencia no existe más que en el período inicial* de la alimentación en materia nitrificable; esta diferencia se atenúa después. Según la opinión de Müntz y Lainé, el papel de la materia orgánica aparece como un papel del principio. La experiencia enseña que, de una manera general, una tierra está tanto más cargada de microorganismos activos y es tanto más apta para nitrificar cuanto más humus contiene.

Los resultados que acabamos de citar ponen la cuestión en su debido punto. Parecía, en efecto, como hemos dicho antes, que había antagonismo entre la presencia del carbono orgánico y el desarrollo de los fermentos nitrificadores. Sin embargo, los fenómenos observados en el seno de los líquidos de cultivo no deben interpretarse de la misma manera que los que ocurren en los medios naturales de la nitrificación. La *forma del carbono* difiere esencialmente en los dos casos. En los medios artificiales la adición de una substancia carbonada difusible ejerce, como hemos visto, una acción desfavorable ó mortal sobre los organismos nitrificadores cuando se pasa de una concentración, aun muy débil; el carbono, tal como existe en la molécula coloide del humus, carece de este poder tóxico.

Abundan las observaciones en que se ha demostrado que el humus, lejos de ser un obstáculo para la nitrificación, la favorece (en presencia del calcáreo). Los hechos contrarios, señalados en cierto momento por Pichard, parecen excepcionales. Según Buhlert y Fickendey (1906), el poder nitrifica-

dor de un suelo sería poco más ó menos proporcional á su riqueza en humus. El exceso de éste sólo es perjudicial cuando la proporción de calcáreo del suelo es insuficiente para neutralizar la acidez, ó cuando el oxígeno circula mal: se produce entonces gas carbónico que puede quedar confinado y la atmósfera se vuelve reductora. Un fenómeno de este género se efectúa en las tierras muy compactas adicionadas de una cantidad demasiado grande de materias orgánicas.

De todos modos no debe exagerarse la influencia de la aereación; Schlœsing, según hemos visto anteriormente, obtuvo la producción de proporciones de nitrógeno nítrico muy aproximadas en presencia de atmósferas que contenían: 10, 11, 16, 21 por 100 de oxígeno.

Si el humus no es un obstáculo para la nitrificación, como acabamos de exponer, parece sin embargo que la amonización de su nitrógeno orgánico es generalmente bastante más lenta, por ejemplo, que la del nitrógeno de una materia orgánica intacta que no ha sufrido todavía los efectos de la humificación. Así es que el nitrógeno de los residuos de prensar ciertas semillas nitrifica mucho más rápidamente que el nitrógeno húmico (Pichard).

Digamos ahora algunas palabras sobre la manera como se comporta, respecto de la nitrificación, un medio rico en materias orgánicas y en nitrógeno.

La nitrificación del *estiércol* en montones es un hecho anormal; esta nitrificación no podría realizarse más que en la superficie del montón, donde la aereación es suficiente, y cuando la fermentación aerobia, que desprende mucho calor, está terminada. En el interior de la masa, la atmósfera está desprovista de oxígeno. Se han citado ejemplos de nitrificación del estiércol en montón; pero, la cantidad de nitratos formados generalmente era muy escasa, salvo cuando había habido adición de cal (Maercker). La reacción fuertemente amoniacal que presenta el estiércol bien regado con su parte líquida se opone, entre otras causas, al establecimiento de la nitrificación. De todos modos, según Niklewski, el fermento nitroso puede existir en el estiércol al lado de los fermentos desnitrificantes.

Influencia de la presencia de los nitritos y de los nitratos en el desarrollo de los microbios de la nitrificación.—Boullanger y Massol (1903) han indicado la temperatura de 45° como fatal para los microbios nitrosos al cabo de cinco minutos; los fermentos nítricos resisten hasta 55°. La temperatura óptima de cultivo para las dos especies de fermentos es de unos 37°. En medio líquido, el fermento

nitroso cesa de actuar cuando la concentración en sulfato amónico llega á 5 por 100. El desarrollo de este fermento se retarda cuando hay producción de 8 á 10 gramos de nitrito magnésico por litro; se detiene si la proporción llega de 13 á 15 gramos. La presencia de los nitritos potásico ó sódico en los medios donde se siembra el fermento nitroso es perjudicial, aun en pequeñas proporciones (1 á 7 gramos por litro); la presencia de los nitratos cálcico ó magnésico no dificulta la acción de los microorganismos más que cuando la concentración llega á 1 por 100 á lo menos. La transformación de los nitritos en nitratos por el fermento nítrico se hace tanto más difícilmente cuanto mayor es la concentración del medio en nitritos. Si esta concentración llega á 2 por 100, la nitrificación queda suspendida.

La presencia de los nitratos potásico, sódico, magnésico, en los líquidos donde se siembra el fermento nítrico, no dificulta su desarrollo mientras la proporción de estas sales es inferior á 20-25 gramos por litro; el nitrato cálcico retarda la nitrificación en la proporción de 12 gramos por litro.

Nitrificación en los medios naturales. Aplicaciones. —Vamos á indicar, en lo que sigue, algunas particularidades que presenta la nitrificación en su medio natural, es decir, en la tierra de labor.

1.° Papel del agua.—De todos los factores que influyen en la nitrificación el más importante es el agua. La proporción de humedad óptima que debe contener un suelo, en el cual se suponen reunidas todas las condiciones indispensables para la nitrificación, varía esencialmente con la estructura física de este suelo. Si los elementos de la tierra son gruesos, si la circulación del agua se efectúa fácilmente, una proporción relativamente pequeña de este líquido asegurará una nitrificación perfecta. Si, por el contrario, los elementos son muy finos, para la buena marcha del fenómeno será indispensable una riqueza en agua muy superior á la precedente. Esto es lo que Schlœsing (1897) ha puesto de manifiesto por medio de un experimento muy convincente.

La observación diaria indica que la nitrificación es menos activa, en general, en las tierras fuertes de elementos finos que en las tierras de elementos gruesos; parece, en efecto, que la permeabilidad del suelo respecto del aire es menor en el primer caso, y que es preciso atribuir este retardo en la nitrificación á una falta de oxígeno: Schlœsing hijo demuestra que, muy á menudo, no es el aire lo que falta en las tierras fuertes, sino más bien el agua. Esto ocurre aun cuando estas tierras fuertes presentan proporciones de humedad iguales, ó superiores, á las de las tierras ligeras, en las cuales las combustiones son muy activas. En el estado normal, cuando el agua no se encuentra en la tierra en proporciones excesivas, no llena los intersticios que existen entre los elementos sólidos (tierra escurrida). Reviste solamente las partículas térreas de una capa delgada. Para una misma proporción de humedad del suelo, el grueso de estas capas será tanto menor cuanto mayor sea la finura de las partículas, puesto que la superficie de éstas irá siempre en aumento. Supongamos que un suelo, con 10 por 100 de agua, contiene una fuerte proporción de arcilla, materia cuyos granos son extremadamente finos; la capa acuosa que recubre cada grano puede ser tan delgada que dificulte la vida microbiana.

El citado autor forma mezclas de arena cuarzosa, cuyo diámetro medio es de $\frac{1}{3}$ de milímetro, arcilla muy grasa, cuyos elementos tienen un diámetro medio inferior á 1 μ, blanco de Meudon y agua, que contiene en disolución sulfato amónico. Se siembran en la mezcla microbios nitrificadores por adición de un poco de mantillo, y se introducen estas tierras artificiales en grandes frascos donde es fácil el acceso del aire. La adjunta tabla indica la composición de cinco suelos artificiales y la cantidad de nitrógeno nitrificado en 73 días por ciento de nitrógeno amoniacal añadido (temperatura 25-27°):

		I	II	III	IV	V
Composición de los suelos	Arena	100	90	80	75	70
	Arcilla . . .	0	10	20	25	30
	Creta	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Agua	10	10	10	10	10
Nitrógeno nitrificado		83	94	89	56	20

Se ve que, en las muestras IV y V, en las cuales la arcilla llega á 25 y 30 por 100, la nitrificación es fuertemente retardada, mientras que en las muestras I, II, III, que representan tierras ligeras, el fenómeno es normal. La falta de aire no podía ser invocada en el primer caso, porque estas muestras eran muy divididas y no apretadas. Se contesta por otra parte á esta objeción de la siguiente manera. Si se aumenta la proporción de agua, la aereación debe disminuir; pues bien, según resulta del examen de las cifras de la tabla

siguiente, la nitrificación, por el contrario, se vuelve más activa: no es pues, aire, lo que falta á los suelos compactos sería agua:

Arena.	70	70	70	70
Arcilla	30	30	30	30
Creta	0,5	0,5	0,5	0,5
Agua	10,6	11,5	13,2	14
Nitrógeno nitrificado	80	100	100	100

Debe deducirse de esto que, en las tierras fuertes, la proporción de agua capaz de mantener regularmente el fenómeno nitrificador debe ser más elevada que en las tierras ligeras.

La continuidad de acción de un fenómeno biológico exige la constancia de los factores que lo provocan. Las alternativas de sequedad y de humedad á que está sometida la tierra de labor, en las circunstancias naturales, dificultan ó favorecen la nitrificación: éste es un hecho fácil de observar cuando se trata, por ejemplo, de la nitrificación de sales amoniacales. Si la humedad pudiera ser mantenida siempre en una proporción favorable, las tierras de labor, aun cuando fuesen enriquecidas con notables proporciones de sales amoniacales, serían capaces de oxidar muy regularmente á este amoníaco. Pero, cuando la tierra se deseca fácilmente, la oxidación del amoníaco queda suspendida. Tal vez por esta razón el sulfato amónico ha sido considerado á veces como un abono tóxico. Las raíces de las plantas soportan más fácilmente el contacto con una solución relativamente concentrada de nitratos que el de una solución de una sal amónica de la misma concentración. De todos modos, á igualdad de peso y en las condiciones favorables, el nitrógeno amónico nitrifica siempre más rápidamente que el nitrógeno orgánico.

Según Dehérain, ocurre con frecuencia que, en el tiempo de veinticuatro horas, más de una centésima parte de la cantidad del nitrógeno amoniacal introducido es capaz de nitrificar; mientras que, con la materia nitrogenada del humus, la oxidación no afecta más que á una millonésima parte del nitrógeno. Cuando se añaden á una tierra proporciones crecientes de sulfato amónico, la nitrificación se detiene en un momento dado; casi siempre la cantidad del nitrógeno nítrico formado es tanto menor cuanto mayor es la proporción del

sulfato añadido. En fin, Müntz y Gaudechon (1912) han comprobado que existe *un funcionamiento óptimo* de los fermentos nitrificadores en una época que, en el clima de París, está comprendida entre el 25 de mayo y el 25 de abril, época que se designa á menudo con la expresión de *el despertar de la tierra*. En los experimentos hechos sobre este punto por estos autores, este máximo ha manifestado ser independiente de toda acción posible de la temperatura, porque ésta se mantenía constante, tanto en la tierra que servía de simiente y que se había mantenido á unos 0°, como en las tierras ó mantillos adicionados de sulfato amónico y sembrados, que habían sido mantenidos á 26°.

2.° Influencia, sobre la nitrificación, de la naturaleza del nitrógeno orgánico.—Se observa frecuentemente que la nitrificación, después de haber seguido una marcha ascendente regular, sufre períodos de paro que no son imputables á ninguna de las circunstancias exteriores indispensables para que se efectúe el fenómeno. Estos paros ó estos retardos deben probablemente atribuirse á una *resistencia especial* que presenta la materia orgánica nitrogenada á las diferentes transformaciones por qué debe pasar antes de que su nitrógeno tome la formá amoniacal.

Esto es lo que demuestra el siguiente experimento, debido á Dehérain (1887), hecho con una tierra desmenuzada y mantenida á un grado de humedad especialmente favorable.

	Nitrógeno nitrificado en 1 día por tonelada de tierra
Del 17 de mayo al 13 de junio de 1887 . . .	2,4 gr.
— 13 de junio al 6 de julio	1,4 »
— 6 de julio al 26 de julio	1,9 »
— 27 de julio al 29 de agosto.	1,5 »
— 29 de agosto al 11 de octubre.	0,6 »
— 11 de octubre al 22 de noviembre . . .	0,2 »

Sabido es que, siendo iguales las demás circunstancias, la actividad de la nitrificación crece con la temperatura. Según esto, el máximo de producción de nitratos habría debido coincidir, en el ensayo anterior, con los fuertes calores del mes de julio del año considerado, porque la división del suelo y los riegos fueron efectuados siempre de la misma manera. Puede hasta ocurrir que el máximo de nitrificación se obtenga, en algunas tierras, en momentos en que la temperatura es relativamente baja. Resulta, pues, que el

único factor al que se puede atribuir la acción, en el presente caso, no es otro *que la naturaleza del nitrógeno del humus*. Las irregularidades observadas no proceden más que de una transformación desigual del nitrógeno complejo. La vitalidad de los microbios transformadores, lo mismo que la de los microbios nitrificadores de amoníaco, que la de los microorganismos nitrificadores, podría también entrar en juego. *La proporción absoluta de nitrógeno orgánico* que contiene un suelo no ejerce acción: en efecto, con frecuencia se verá que una tierra más pobre que otra nitrifica mejor que esta última. Sin embargo, los suelos agotados por el cultivo contienen, casi siempre, materias nitrogenadas difícilmente nitrificables.

Esta resistencia del nitrógeno orgánico aparece bien en el siguiente experimento, debido á Marcille (1896). Tres tierras contienen respectivamente 2,74 gramos, 0,5 gramos y 1,2 gramos de nitrógeno orgánico por kilogramo. Se extienden en capas delgadas, convenientemente humedecidas (15 á 18 p. 100 de agua), y se someten de vez en cuando á la trituración. He aquí cuál fué la riqueza de estas tierras en nitrógeno nítrico, en diferentes épocas, en 100 gramos de tierra:

	Al principio 12 de novbre. 1895	12 de diciembre.	15 de enero de 1896	4 de marzo
I. . . .	3,3 mgr.	26,0 mgr.	53,7 mgr.	81,2 mgr.
II. . . .	4,4 »	15,6 »	31,2 »	37,5 »
III. . . .	8,0 »	8,0 »	9,0 »	10,0 »

Así, el 24 de marzo, la muestra I contenía 23 veces más nitrógeno nítrico que el 12 de noviembre: la muestra II, 8,8 veces más; la muestra III 1,25 veces más. Dadas estas enormes diferencias, había motivo para buscar si debían ser atribuídas á la desigual energía de los fermentos del suelo. Para ello, en pequeños matraces que contenían sulfato amónico en solución esterilizada, se sembraron indicios de cada una de las tres muestras. Al cabo de 35 días se determinó en cada uno de ellos el nitrógeno nítrico: el primero, sembrado con la muestra I, contenía 38 miligramos de nitrógeno nítrico, el segundo 15,2, el tercero 19. Estos resultados no podían preverse: la muestra III, cuyos microbios nitrificaron mejor que los de la muestra II, había producido, según la tabla anterior, una nitrificación natural muy poco activa. La resistencia á la nitrificación reside, pues, en una causa que no depende de los fermentos mismos. No podría darse la culpa á la pobreza de las muestras precedentes en ácido fosfórico, porque la I contenía 0,58 gramos por kilogramo, la II 2,8 gramos y la III 1,2. Resulta, pues, que esta resistencia debe buscarse en la *naturaleza misma de la materia nitrogenada compleja*. La muestra III que, en las condiciones naturales, nitrifica muy poco, parece contener una materia nitrogenada difícilmente atacable. La exactitud de esta hipótesis puede comprobarse así: en

efecto, si se calienta á 120° cierta cantidad de esta última tierra y se la siembra después de la calefacción, produce, en el mismo tiempo, más ácido nítrico del que producía antes de la calefacción. La naturaleza de la materia orgánica es, pues, la única que entra aquí en juego.

La resistencia á la nitrificación de ciertas tierras turbosas, adicionadas de cal, es imputable á la naturaleza del humus más bien que á la constitución física de la masa. Dumont (1901) ha demostrado que el sulfato amónico era capaz de nitrificar en este medio: la inercia del nitrógeno orgánico debe, pues, referirse á un defecto de amonización.

3.° Influencia de ciertas sales en la nitrificación. — Warington ha demostrado que una adición de carbonato sódico al suelo ejerce una influencia desfavorable en la nitrificación: el bicarbonato se comporta de una manera inversa, por ser casi nula su causticidad. El carbonato amónico, en escasa cantidad, nitrifica bien: pero, si la proporción se exagera, no se ven aparecer más que nitritos y nada de nitratos. Una proporción algo considerable de esta sal, hasta se opone á la producción del ácido nitroso. Por esto es preciso diluir la parte líquida del estiércol antes de aplicarla al suelo.

Según Dumont y Crochetelle (1983), el carbonato potásico activa la nitrificación de las tierras ricas en humus, con tal de que la cantidad de esta sal no pase de 2 á 3 p. 100; en mayores proporciones esta sal es dañosa. El cloruro sódico sólo perjudica á la nitrificación cuando llega á una proporción elevada, ó sea 0,5 p. 100, según Dehérain: el cloruro potásico es menos tóxico, pero su influencia sobre la nitrificación es débil. En la proporción de 7 á 8 p. 100, el sulfato potásico favorece la nitrificación (Dumont y Crochetelle). Pichard (1884) había reconocido ya esta acción bienhechora, así como la de los sulfatos sódico y cálcico, en la proporción de 5 p. 1000. Sin embargo, algunos autores atribuyen al yeso una acción dudosa sobre la nitrificación.

Nitrificación intensiva.—Según resulta de la exposición que acabamos de hacer, el fenómeno nitrificador es de una constancia notable. Los microbios nitroso y nítrico se encuentran en todas partes, y cuando se realizan las condiciones que antes hemos señalado (pág. 439) el nitrógeno amoniacal se convierte en nitrógeno oxidado. Pero, la intensidad del fenómeno varía cuando la intensidad de los factores que regulan su existencia también varía. Las oscilaciones, á veces considerables, que experimenta la proporción de humedad del suelo, los cambios bruscos ó progresivos

de temperatura, la naturaleza del nitrógeno orgánico, son los tres factores que tienen más influencia en la variabilidad de la nitrificación.

Müntz y Lainé (1905) han tratado de acelerar en proporciones muy notables el fenómeno nitrificador, operando con soluciones de sales amónicas que se hacían resbalar por soportes sólidos é inertes, expuestos al contacto con el aire. Los ciscones contundidos, empleados con éxito en los campos de depuración, constituyen un medio muy oxidante. Pero, según estos autores, el negro animal en grano favorece mejor la oxidación, sobre todo cuando se opera con soluciones de sulfato amónico relativamente concentradas (7,5 gramos por litro). En un volumen de 10 decímetros cúbicos, el negro animal puede producir, por día, una cantidad de 8,1 gramos de ácido nítrico expresado en NO^3K. La concentración del sulfato antes señalada, parece corresponder al efecto máximo: un líquido más concentrado (10 gramos) no nitrifica tan bien. Se han podido emplear hasta 960 centímetros cúbicos de solución amónica por día para 10 decímetros cúbicos de negro animal. Operando á 30°, si se pusiera en la superficie de una hectárea una capa de negro animal en grano, de 2 metros de altura, previamente sembrada de organismos nitrificadores, estando el conjunto cerrado y resguardado, sería posible, regando metódicamente la masa con la solución de sulfato indicada, obtener un peso de 16000 kilogramos de nitrato potásico por día, ó sea cerca de 6 millones de kilogramos de nitro al cabo de un año. El líquido así cargado de nitro es muy diluído (8 á 9 gramos por litro); pero, se podría introducir en él una cantidad de sal amónica igual á la que contenía en su origen y volver á hacer pasar por la capa oxidante el líquido, que contendría al mismo tiempo nitro y sal amónica. Se repetiría la operación cierto número de veces, hasta que la proporción del nitro formado se opusiera á la nitrificación.

Los citados autores han probado de transportar esta nitrificación intensiva á la tierra de labor. Esta, mantenida á un grado de humedad favorable y constante, oscilando su temperatura entre 15 y 22°, era removida de vez en cuando para remedar una labor. He aquí algu-

nos de los resultados obtenidos. Una mezcla de partes iguales de tierra franca y mantillo, adicionada de 2 p. 100 de sulfato amónico, ha dado, en veinticuatro horas y por kilogramo de materia, 0,350 gr. de nitratos, ó sea 350 gramos por metro cúbico. Una nitrería de una hectárea, con una capa de 50 centímetros de espesor, daría, por día, 1750 kilogramos de nitro ó 650000 por año aproximadamente. Un mantillo muy consumido, adicionado de 1 por 1000 de sulfato amónico, ha producido, por kilogramo y por día, 0,630 gr. de nitro, ó sean 3250 kilogramos por hectárea con una capa de 50 centímetros, ó bien 1200000 kilogramos en un año. Si se substituye el sulfato á medida que nitrifica, se pueden cargar así gradualmente las tierras de tal manera que, en ciertos casos, de muelles y ligeras que eran al principio, pasaban á ser pastosas y plásticas como una arcilla. A veces la nitrificación se detenía á causa de la neutralización del calcáreo: se reanudaba cuando se añadía calcáreo nuevamente. Se llega así á una proporción variable de 27 á 33 gramos de nitro por kilogramo, según la tierra empleada. Conociendo la cantidad de agua que impregna la tierra, se puede evaluar la concentración de esta agua en nitro: varía, según los casos, de 55 á 157 gramos de nitro por litro. Es, pues, posible fabricar cantidades de nitro, incomparablemente superiores á las que producían las antiguas nitrerías.

Müntz y Lainé, continuando sus investigaciones (1906), han observado que la turba, adicionada de calcáreo, puede producir, después de sembrada de organismos vivaces y de adición de sulfato amónico, en las mismas horas que las antes dichas, la enorme cantidad de 48000 toneladas de nitro por año y por hectárea, ó sea 8 veces más que el negro animal del experimento citado. Las turbas ligeras y esponjosas, de descomposición poco avanzada, son las mejores como medio. Pudiendo continuar la nitrificación en soluciones muy cargadas de nitratos, se puede, como se ha dicho antes, añadir á los líquidos nitratados una nueva proporción de sal amónica y volverlos repetidas veces á la capa oxidante. Se ha obtenido así:

	1.er paso	2.°	3.°	4.°	5.°
Nitrato por litro (calculado en NO^3K). .	8,5 gr.	17,4 gr.	25,4 gr.	32,9 gr.	41,7 gr.

La turba, empleada como sostén para los organismos nitrificadores, permite, pues, la producción intensiva del nitro. Pero, *¿puede suministrar la turba por sí misma la materia nitrificable?* Su destilación seca no da, en los líquidos que destilan, más que una fracción bastante pequeña de nitrógeno en forma de amoníaco. Sin embargo, si se destila la turba en una corriente de vapor recalentado, á lo menos los $^4/_5$ de su nitrógeno pueden ser recogidos en estado de amoníaco. Sería posible, pues, extraer así de la turba, en forma de amoníaco, el nitrógeno inerte que contiene, y se obtendría de esta manera la primera materia de una nitrificación intensiva.

Nitrificación comparada en el suelo y en las capas bacterianas.—El medio *tierra* es incomparablemente más apto para nitrificar el nitrógeno orgánico que se le confía que los medios artificiales, tales como las capas ó lechos bacterianos en la depuración de las aguas de las cloacas. Por esto no se pueden comparar entre sí estos dos modos de depuración. Esto es lo que resulta de los recientes experimentos de Müntz y Lainé (1911) sobre las pérdidas de nitrógeno experimentadas al esparcir las aguas de las cloacas, por una parte en lechos bacterianos y por otra en una buena tierra de labor.

Estos autores observan que sólo 16 p. 100 del nitrógeno de las aguas infectadas se elimina *en estado gaseoso* cuando se esparcen estas aguas en la tierra, nitrificándose regularmente el resto del nitrógeno: mientras que, esparcidas estas aguas en las capas bacterianas, la pérdida en nitrógeno gaseoso es aproximadamente de 60 p. 100. Los dos modos de depuración son, pues, muy diferentes. En las capas bacterianas, la acción de los organismos comunes de la combustión de la materia orgánica es predominante, y el fenómeno nitrificador queda relegado á la segunda fila. En el suelo ocurre lo contrario: la nitrificación predomina, y la acción que ejercen sobre los compuestos nitrogenados los organismos comunes de la destrucción de la materia orgánica es muy limitada.

Nitrificación en los medios ácidos.—Existe, por último, una cuestión muy importante que afecta directamente á la nutrición vegetal, y de la cual conviene decir aquí algunas palabras: la cuestión de la presencia ó de la ausencia de los nitratos en los terrenos ácidos.

Hemos insistido varias veces en la necesidad de la presencia de una base (carbonato alcalino ó alcalinotérreo) en el suelo ó en los medios artificiales para que pueda desarrollarse la nitrificación. Cuando la base ó su carbonato están neutralizados, por la acción del ácido nítrico, la nitrificación se detiene y no se reanuda más que si se añade al medio una nueva proporción de base. En realidad, la presencia de nitratos en los suelos llamados *ácidos*, como las turberas, tierras de bosques, de landas, de brezo, ha sido negada por muchos autores.

Ebermayer ha examinado sobre este punto un gran número

de muestras de suelos forestales de Baviera, y no ha encontrado más que vestigios de nitratos; á menudo los nitratos faltaban en absoluto. ¿Debe deducirse de esto que la nitrificación es imposible en estos suelos á causa de la falta misma de carbonatos, ó bien puede suponerse que se forma poco ácido nítrico y que éste es inmediatamente absorbido por los vegetales que crecen en los bosques ó en las turberas como á veces se ha afirmado? Algunos autores opinan que los nitratos se formarían en estos medios ácidos y serían fácilmente reducidos, primero á nitritos y luego á amoníaco; y que esta última forma del nitrógeno sería utilizada directamente por las plantas. Parece poco probable que las micorhizas, de que están provistas las raíces de muchas plantas humícolas, intervengan directamente para digerir en algún modo el nitrógeno orgánico que se encuentra en su contacto y ofrecer así al vegetal una forma difusible del nitrógeno que aun falta definir, pero la cual pueden ellas ciertamente aprovechar. Sea lo que fuere, la posibilidad de la nitrificación en estos medios ácidos es una cuestión que todavía no está resuelta de un modo satisfactorio, aun cuando, como hemos dicho antes (página 467), Dumont atribuya esta inercia del nitrógeno de las turberas á una falta de amonización. Los microbios nitrificadores existen en los suelos ácidos, puesto que basta encalarlos ó añadirles marga para ver aparecer en ellos nitratos, frecuentemente al cabo de muy poco tiempo. Por otra parte, muchas observaciones demuestran que ciertos suelos ácidos contienen efectivamente nitratos. ¿Se trata aquí de la presencia de las bacterias ordinarias de la nitrificación ó de especies nuevas? Su cultivo no ha dado hasta ahora ningún resultado concluyente.

He aquí algunos datos respecto de este punto: Chuard (1892) observa que, en la parte superior de las turberas, se encuentra una capa de substancia blanda, ligera, llamada *mantillo de turba*. Sacada de su yacimiento, esta capa no contiene más que nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal (?); pero, los nitratos se acumulan en su masa en proporciones tanto más elevadas cuanto más tiempo hace que este mantillo ha sido extraído del punto donde se ha formado y se ha expuesto al aire. Pues bien, este medio, muy rico en carbono orgánico, carece de base salificable. El cultivo de la nitrobacteria no ha

dado, después de siembras sucesivas, más que una nitrificación muy poco intensa.

Según Migula (1900), los suelos de bosques contienen microbios nitrificadores. En las capas superiores de estos suelos, aun cubiertos de hojas en descomposición, no hay nitrificación, porque el exceso de materia orgánica sería un obstáculo para que el fenómeno se efectúe. Pero, éste se realiza, por el contrario, en las capas profundas (10 á 20 centímetros). Se encuentran zonas cuya intensidad nitrificante es variable, y cuyas posiciones son diferentes de las que ocupan en una tierra de labor. Es notable ver que la producción de ácido nitroso se manifiesta incomparablemente más pronto que la del ácido nítrico en los medios de cultivo sembrados de tierras de bosque. El autor opina que, á causa de la lenta descomposición de las materias orgánicas, la formación de los nitratos y la de los nitritos se limitan á un corto espacio de tiempo, puesto que la actividad de las bacterias de la putrefacción renace en otoño, en la época de la caída de las hojas, cuando cesa la de las bacterias nitrificantes. Resulta así que el suelo de los bosques sólo contiene nitratos en un período de tiempo bastante corto, durante el cual los árboles pueden apoderarse de ellos.

Weiss (1909) ha encontrado también nitratos en el suelo de los bosques de Dinamarca, casi desprovistos de calcáreo. Estos nitratos eran más abundantes en los meses fríos del año, menos abundantes durante los meses de calor. ¿Es atribuíble esta diferencia á un paro de la nitrificación por falta de agua en los meses cálidos, ó á una absorción de estos nitratos por los árboles? Se ve que esta cuestión de la nitrificación en los medios naturales ácidos requiere todavía muchas aclaraciones.

Resumen del estudio de la nitrificación.—Este fenómeno, de gran importancia, es bien conocido actualmente en sus causas principales. Ejerce, en la fertilidad de los suelos, una influencia de primer orden. Recordemos, una vez más, las condiciones naturales que provocan la nitrificación, teniendo bien entendido que los microbios, agentes del fenómeno, existen en todas partes; suponemos también que la temperatura es favorable. El suelo debe ser calcáreo, pero bastan algunas milésimas para obtener una nitrificación regular; debe ser asimismo suficientemente húmedo. Como hemos dicho antes, la proporción de agua necesaria varía esencialmente con la naturaleza física del suelo, es decir, con el espesor de la capa acuosa que recubre los elementos térreos. Una tierra de consistencia media, que se acerque á las tierras francas, deberá contener 20 por 100 de agua aproximadamente. Cuanto más

compacta sea, mayor deberá ser la proporción de agua, sin pasar, sin embargo, de cierto grado; porque sabemos que las cantidades de agua y de aire contenidas en el suelo son complementarias.

La *forma de la materia orgánica* no es indiferente. El humus natural nitrifica siempre, pero á veces con gran lentitud, sobre todo si se trata de tierras agotadas por el cultivo: lo que prueba, una vez más, que lo que llamamos *humus* es una substancia muy heterogénea. El nitrógeno de la materia orgánica aun no humificada (abonos verdes, estiércol, residuos de prensar semillas) nitrifica en general más rápidamente que el mismo humus. Pero, si se añaden proporciones demasiado grandes de carbono orgánico, se presenta un fenómeno antagónico del de la nitrificación: no sólo no se forman ya nitratos, sino que los preexistentes se reducen formando productos menos oxidados, y hasta amoníaco, y por fin nitrógeno libre. Esta desnitrificación será, luego, objeto de un detenido estudio; porque, donde se presenta, compromete la nutrición nitrogenada del vegetal.

Para favorecer la nitrificación natural es necesario, en cuanto sea posible, mantener el suelo suficientemente húmedo y darle frecuentes labores. Estas han sido reconocidas como especialmente favorables para el mantenimiento de la fertilidad de las tierras. Las labores que se dan al suelo difunden los microorganismos de toda clase, tanto los que oxidan al amoníaco como los que determinan su formación. Además, el suelo se airea, los terrones voluminosos se desmenuzan, y se evita así la formación de medios compactos. El empleo de abonos orgánicos, cualquiera que sea su origen, no sería provechoso sin un cuidadoso trabajo mecánico del suelo.

V

FENÓMENOS DE REDUCCIÓN DE LOS NITRATOS

Hemos definido en las anteriores páginas los fenómenos que presiden la oxidación del nitrógeno complejo, y hemos enseñado por qué mecanismo esta forma del nitrógeno se con-

vierte en nitrógeno nítrico. Busquemos ahora cuáles son las causas que intervienen para producir, en las condiciones naturales, la desoxidación de los nitratos.

Causas de la destrucción del nitrógeno combinado. —Estas causas son de dos órdenes. Todas las *combustiones vivas* de las materias vegetales (plantas, hulla), ó animales, desprenden en gran parte en estado libre el nitrógeno combinado que estas materias contenían. En segundo lugar, *ciertos microorganismos* intervienen para desoxidar poco á poco al nitrógeno nítrico y hacerle recorrer todos los términos de la reducción: nitrógeno nitroso, óxido nítrico, óxido nitroso, amoníaco, hasta la destrucción total de toda combinación y desprendimiento del nitrógeno elemental. Estas son las acciones destructoras de la materia nitrogenada, engendrada por muchos microbios específicos, en que ahora vamos á ocuparnos. Este estudio es muy importante: en efecto, ciertas formas de nitrógeno combinado—en primer lugar los nitratos, fuente de nitrógeno de que tantos vegetales se nutren—pueden desaparecer en diversas circunstancias por efecto de las reducciones que estos nitratos experimentan por el hecho de la intervención de algunos microorganismos comunes en el suelo. Pero, entre los numerosos agentes microbianos á que son atribuibles estas reacciones, los unos no convierten al ácido nítrico más que en ácido nitroso; los otros, llevando más allá la desoxidación, eliminan completamente el oxígeno de la molécula: de donde deriva la formación, ya sea de amoníaco, ya de nitrógeno gaseoso.

A pesar del número y del valor de algunos de estos trabajos efectuados sobre la desnitrificación, este fenómeno dista mucho de ser tan bien conocido como el de la nitrificación.

Conviene, por de pronto, decir algunas palabras acerca de la destrucción por putrefacción de las materias orgánicas nitrogenadas *que no contienen nitrógeno oxidado*.

Naturaleza de los gases desprendidos en la putrefacción de las materias orgánicas nitrogenadas en ausencia de nitratos ó de nitritos.—¿Qué ocurre, desde el

punto de vista del desprendimiento de gases, cuando substancias tales como carne, albúmina, estiércol, etc., entran en putrefacción en contacto con el aire?

Reiset (1856) ha estudiado el desprendimiento gaseoso que se produce en la descomposición del estiércol poco ó muy consumido, y en la de la carne, poniendo muchos kilogramos de estas materias debajo de una campana y suministrando á la masa un volumen conocido de gas oxígeno. La conclusión del autor es que la materia orgánica en vía de putrefacción absorbe cantidades considerables de oxígeno y desprende gas carbónico; la duración del experimento fué, en algunos ensayos, de 33 días. El nitrógeno de las sales amónicas, de los nitratos (?), de las materias nitrogenadas fijas que pueden formarse durante esta putrefacción no representa todo el nitrógeno contenido primitivamente en estas materias; habría siempre *un desprendimiento muy notable de nitrógeno en estado gaseoso.*

Observemos que no deben existir en ningún momento nitratos en los medios orgánicos de que acabamos de hablar, y que los experimentos de Reiset tenderían á hacer creer que todas las putrefacciones que se efectúan en presencia del oxígeno en exceso ocasionan pérdidas, á veces considerables, de nitrógeno libre. Sin embargo, no parece que generalmente ocurra esto, y debe admitirse con Schlœsing (1889) que el desprendimiento del nitrógeno gaseoso es, en tales condiciones, infinitamente pequeño.

Este último autor ha operado con pesos de substancias mucho menos elevadas (unos diez gramos por término medio) que las que había empleado Reiset. En un matraz cerrado, provisto de un tubo barométrico, que contenía la substancia que se quería estudiar (carne, pescado, queso, estiércol de caballo, etc.), se hace primero el vacío; luego se introduce un volumen de aire rigurosamente medido. Á medida que va desapareciendo el oxígeno, se introducen nuevas cantidades conocidas de este gas y, finalmente, al cabo de doce ó catorce meses, se hacen pasar los gases del aparato á un volumenómetro.

Schlœsing ha encontrado que, si se compara el volumen del nitrógeno desprendido con el peso del nitrógeno amoniacal producido, se observa que las pérdidas de nitrógeno en

estado gaseoso son muy escasas; lo que, según el autor, podría explicarse por el hecho de que sus experimentos duraron mucho más que los de Reiset: sería posible que el nitrógeno gaseoso sólo se desprendiera al principio. He aquí algunas cifras que demuestran la escasez del desprendimiento de nitrógeno en estado libre comparado con la producción de nitrógeno amoniacal.

Materias sometidas á la fermentación	Nitrógeno contenido en las materias en el estado inicial	Nitrógeno desprendido en estado de gas	Nitrógeno aparecido en estado de NH^3	Nitrógeno gaseoso desprendido por 100 de nitrógeno amoniacal formado
Judías	0,4120 gr.	3,8 mgr.	191,5 mgr.	2
Queso	0,2185 »	4,9 »	169,8 »	2,9
Pescado . . .	0,2810 »	3,1 »	235,8 »	1,3
Estiérc. de caballo.	0,1090 »	2,3 »	284,0 »	0,8

En la misma época, Schlœsing ha demostrado que, durante la fermentación formémica del estiércol, á 52°, *no se produce nada de nitrógeno gaseoso*.

Abandonado durante algunas horas en contacto con el aire para permitirle que se sembrara espontáneamente, un líquido esencialmente putrescible, como la sangre, puesto luego en un recipiente cerrado provisto de un tubo de desprendimiento y mantenido á una temperatura de 40 á 45°, no ha dado, al cabo de unos cuatro meses, en que ya había cesado todo desprendimiento, *más que gas carbónico, sin indicios de gases combustibles, ni de nitrógeno*. El magma líquido contenía amoníaco, ácidos grasos volátiles y principios nitrogenados fijos (Berthelot y André, 1892).

Kellner y Yoshii (1888) han hecho ver que, en la putrefacción de las semillas y en la de la leche, cebadas con orina en descomposición, ni aparecía nitrógeno libre, ni se formaba nitrógeno nítrico. Una mezcla de orina putrefacta, asparagina y semillas de *Soja* no pierde nitrógeno en estado gaseoso.

Parece, pues, que á lo menos en la generalidad de los casos, la putrefacción, en presencia ó en ausencia de una materia nitrogenada que no contenga nitratos, ni nitritos, ni pueda producirlos, no va acompañada de pérdida de nitrógeno gaseoso. Solamente se desprende gas carbónico: á veces este gas va acompañado de metano y de hidrógeno. Veremos, á continuación, que esta conclusión parece casi siempre justificada, y que los desprendimientos de nitrógeno libre que se observan en la naturaleza van unidos á la presencia de un compuesto oxigenado de nitrógeno. De todos modos, y en condi-

ciones insuficientemente definidas, puede ocurrir un desprendimiento de nitrógeno gaseoso en diversos medios en putrefacción que no contengan nitrógeno nítrico (Gibson, 1895).

Reducción de los nitratos (1).—Esta reducción ha sido estudiada por primera vez detenidamente por Gayon y Dupetit (1882-1885); pero, ya en el año 1875, Meusel había indicado su origen microbiano.

Schlœsing, como hemos dicho antes (pág. 440), había observado, en sus estudios sobre la nitrificación, que si se introducen en una alargadera algunos kilogramos de tierra rica en nitratos, se observa que el oxígeno del aire incluído en la vasija es rápidamente absorbido: no sólo desaparecen los nitratos, sino que la misma materia orgánica suministra cierta cantidad de nitrógeno gaseoso.

Las primeras investigaciones de Gayon y Dupetit fueron hechas con ciertos microorganismos, capaces de convertir los nitratos en nitritos sin desoxidación ulterior de éstos. Si se deja en contacto con el aire caldo que contenga en disolución un poco de nitrato potásico, el líquido se enturbia, se puebla de organismos microscópicos, y se observa la presencia de nitrito potásico. Gayon y Dupetit aislaron de este medio cuatro especies de microbios anaerobios, susceptibles de producir análoga reducción. Observaron también que el *microbio del cólera de las gallinas*, la *bacteridia carbunclosa* y el *vibrión séptico*, producen el mismo fenómeno, pero que la proporción del nitrito formado es mucho menor que la que se obtiene con las especies precedentes. Estos experimentos demuestran claramente la *ubicuidad de los seres capaces de reducir el nitrógeno nítrico*.

Poco después, estos autores aislaron del agua de las cloacas nitratada dos nuevos microbios: el *Bacterium denitrificans* α y el *B. denitrificans* β, más activo el primero que el segundo. Estos dos microbios son muy ávidos de oxígeno: toman este gas, ya del aire libre, ya del nitrato: son, pues,

(1) Bagros ha publicado una reseña histórica, bastante completa, de la reducción de los nitratos (*Sur le mecanisme de la denitrification par les bactéries denitrificantes indirectes. Thèse de doctorat de l'Université de Paris*, 1910.)

según los casos y con la misma facilidad, aerobios y anaerobios. El *B. denitrificans* α (el más activo de ambos) se desarrolla mejor y destruye más nitratos en un caldo de carne que en el agua de las cloacas. Es muy notable que el ácido salicílico, la anilina, el fenol, que son, respecto de la mayoría de los microorganismos, materias antisépticas, no impidan el desarrollo del *B. denitrificans*. Según la riqueza del medio, esta bacteria produce, ya un desprendimiento de nitrógeno libre solo, ya, al mismo tiempo, un desprendimiento de gas carbónico. En un medio rico en materias orgánicas, el nitrógeno va mezclado con ácido carbónico: pero, cuando este último gas no se encuentra en las condiciones necesarias para su saturación, no se desprende más que nitrógeno.

La siguiente ecuación da cuenta de la reacción reductora producida por el *B. denitrificans:*

$$4NO^3K + 5C = N^4 + 2K^2CO^3 + 3CO^2$$

siendo tomado el carbono de la materia orgánica del caldo. Correlativamente se observa una producción de amoníaco. La totalidad del oxígeno del ácido nítrico actúa sobre el carbono de la materia orgánica del caldo: á veces, el análisis permite comprobar el desprendimiento de un ligero exceso de nitrógeno gaseoso, que procede del nitrógeno del medio orgánico.

El microbio α, sembrado en un líquido artificial nitratado, que contenga ácido nítrico y asparagina, adicionados de materias minerales, produce un desprendimiento de óxido nitroso N^2O junto con nitrógeno y gas carbónico. Así, pues, según la composición del medio nutritivo, el nitrógeno del nitrato se desprende en estado libre, o bien mezclado con óxido nitroso.

Los destructores anaerobios de materias hidrocarbonadas, tales como el *Bacillus amylobacter*, muy común en el suelo, desprenden hidrógeno y gas carbónico con formación de ácido butírico. Dehérain y Maquenne (1883) habían atribuído á este microbio, del cual ya hemos hablado antes (pág. 407), el poder de reducir los nitratos con producción de óxido nitroso y de nitrógeno; creían que el hidrógeno desprendido era, en este caso, el agente de la reducción. Gayon y

Dupetit demuestran que el *B. amylobacter*, cuando está *en cultivo puro*, no ataca al nitrato potásico en presencia del azúcar y no reduce más que indicios en presencia de fécula ó de glucosa, aun cuando haya un abundante desprendimiento de hidrógeno. El experimento de Dehérain y Maquenne demostraba bien, en realidad, el hecho de la reducción de los nitratos, pero como estos autores habían trabajado con tierra en bruto, el ó los verdaderos agentes reductores de los nitratos, se les habían escapado. En uno de sus experimentos, el volumen del óxido nitroso desprendido representaba aproximadamente $^1/_{12}$ del volumen total de los gases recogidos.

Así, pues, la nitrificación no corresponde á todos los microbios reductores: no se efectúa más que en presencia de algunos seres de funciones específicas.

Importancia práctica de los fenómenos de desnitrificación.—Gayon y Dupetit han fijado la importancia práctica de estos fenómenos. Si se toma mantillo de jardín, se mezcla con un peso de piedra pómez calcinada y se deja caer encima de este mantillo, gota á gota, agua de cloacas nitratada con 100 miligramos por litro y esterilizada — operando en el seno de una atmósfera de nitrógeno—se observa que la solución se empobrece en ácido nítrico. Esto demuestra en el mantillo y en la tierra vegetal la presencia de organismos desnitrificantes. El *B. denitrificans* α, sembrado en una muestra de tierra esterilizada y enriquecida de nitrato, reduce esta sal, y esta reducción aumenta con la adición de agua azucarada. Si la muestra es rica en humus, es inútil añadir substancias hidrocarbonadas. La tierra se despoja así de todo el nitrógeno del nitrato: además, pierde cierta cantidad del nitrógeno constituyente de su materia orgánica.

Gayon y Dupetit hacen observar que esta reducción de los nitratos, ya sea que éstos procedan de una nitrificación natural, ya que hayan sido añadidos al suelo en forma de abonos, apenas es de temer en las condiciones ordinarias de un buen cultivo, porque el suelo es sometido entonces á labores que permiten que el aire circule fácilmente alrededor de las partículas térreas. Pero, si la atmósfera de los suelos pasa á ser reductora, á causa de la presencia de una capa de agua en su superficie, ó solamente de un grado demasiado grande de humedad, pueden manifestarse los fenómenos de reducción de los nitratos.

Estos primeros experimentos nos enseñan, pues, la realidad de la reducción de los nitratos por vía microbiana. Se comprende ahora la importancia del fenómeno y la necesidad de definir mejor la naturaleza y el modo de acción de los organismos que provocan esta reducción. En resumen, la cuestión que se presenta aquí es ésta: ¿cuáles son los microorganismos que reducen solamente los nitratos ó nitritos?; ¿cuáles son los que, llevando más allá la desoxidación, ponen en libertad al nitrógeno en estado gaseoso? Si sólo el primer fenómeno caracteriza la desnitrificación, apenas sería de temer, porque los nitritos, en condiciones favorables, podrían regenerar los nitratos, y el nitrógeno combinado no se perdería. Pero, cuando la reducción pasa del término *nítrico* ó del término *amoníaco*, el nitrógeno se pierde para la vegetación.

Algunos trabajos que siguieron de cerca á la publicación de los de Gayon y Dupetit se refirieron á las condiciones en que se efectúa el desprendimiento del nitrógeno libre, más bien que sobre la naturaleza de las especies microscópicas que provocan semejante transformación.

Condiciones diversas en que se observa la desaparición de los nitratos.—Muchos autores pensaron entonces que la reducción de los nitratos era imputable *á la presencia de la materia orgánica misma*, ya sea la que contienen los medios naturales, ya la de los caldos de cultivo.

Kellner y Yoshii (1888), después de haber demostrado, como hemos dicho antes, la ausencia de nitrógeno gaseoso en las putrefacciones que se efectúan en el seno de las materias nitrogenadas exentas de nitratos y de nitritos, observaron que las pérdidas de nitrógeno libre no ocurren más que cuando hay oxidación del amoníaco por el oxígeno del aire, actuando el ácido nitroso formado sobre los compuestos orgánicos nitrogenados. La nitrificación normal iría, pues, siempre acompañada de una pérdida de nitrógeno gaseoso. Este último hecho, por otra parte, ya fué observado por Warington, cuando este sabio repitió los primeros experimentos de Schlœsing y Müntz.

Según Tacke (1889), y confirmando hechos avanzados por Kellner y Yoshii, la putrefacción de la harina, de la carne, de la hierba, cebada con un poco de tierra ó de queso podrido, no produce nitrógeno gaseoso en presencia ó en ausencia de oxígeno. Si á este medio se le añade un nitrato, aparece el nitrógeno gaseoso, como sus óxidos inferiores. El libre acceso del oxígeno disminuye, pero no suprime esta reducción.

Leone (1891), habiendo tenido ocasión de estudiar la nitrificación y la desnitrificación en las aguas potables, observó que añadiendo gelatina ú otras materias orgánicas á un agua en vía de nitrificación, se producía ácido nitroso y después amoníaco. Cuando la substancia adicional está gastada, el amoníaco y el ácido nitroso desaparecen y se ve reaparecer el ácido nítrico. Si se mezclan con 100 kilogramos de tierra en vía de nitrificación, 300 gramos de estiércol fresco, la nitrificación se detiene; se forma ácido nitroso y después amoníaco. Al cabo de treinta y cinco días desaparece á su vez el amoníaco; es substituído por el ácido nitroso. A los tres meses, la tierra no contenía más que nitrógeno nítrico. Leone creía que esta desnitrificación era atribuíble al desarrollo rápido de ciertos gérmenes que encuentran en la presencia de un exceso de materia orgánica un medio favorable á su multiplicación: estos gérmenes necesitan oxígeno, y este gas no basta ya para las exigencias de la nitrificación.

Volveremos más adelante á tratar de los fenómenos producidos por la aplicación al suelo de una proporción exagerada de abonos orgánicos.

Nuevas tentativas de aislamiento de microorganismos reductores.—Sin embargo, Frankland (1889) se ocupó en aislar del aire y del agua potable una serie de microorganismos capaces de reducir el ácido nítrico. Las especies más reductoras fueron encontradas en el agua *(Bacillus racemosus, B. violaceus, B vermicularis, B. aquatilis)*. Estas especies provocan la formación de ácido nitroso acompañado de un poco de amoníaco, procedente este último, sin duda, del nitrógeno de la peptona, empleada en el medio de cultivo. En todos los casos en que se observaba la reducción parcial ó total del nitrato á nitrito, la suma del nitrógeno nitroso y del nitrógeno nítrico en la solución en fermentación era idéntica á la cantidad del nitrógeno nítrico del líquido inicial. Existen, pues, como han demostrado Gayon y Dupetit, especies reductoras que no llevan la desoxidación más allá del término nitroso.

La ubicuidad de los fermentos desnitrificadores es, pues, cierta, y su poder reductor, si bien no se manifiesta siempre, puede ponerse en evidencia modificando algo las condiciones del medio. En efecto, Bréal (1892) observa que los nitratos, que existen en casi todas las aguas naturales, se encuentran por esto mismo en la superficie de una multitud de substancias sólidas mojadas por estas aguas. Por ejemplo, en la superficie de la paja se encuentran nitratos: si se inmerge esta paja en agua, los nitratos desaparecen. Si se añade al líquido una pequeña cantidad de un nitrato, éste desaparece á su vez. Un poco de tierra vegetal, humedecida con agua que haya estado en contacto de paja, puede perder todo el ácido nítrico que primitivamente contenía: hasta se desprendería, en estas condiciones, nitrógeno en estado gaseoso. Un gran número de otras subs-

tancias vegetales producen la misma reducción. Pero, el fermento reductor no encuentra en las tierras labradas un medio apropiado para su desarrollo, porque estas tierras no son generalmente bastante húmedas para que los restos vegetales que contienen permanezcan impregnados de agua: en los suelos compactos, por el contrario, que están largo tiempo húmedos, esta reducción siempre se efectúa.

Según Bréal, es fácil comunicar á un suelo propiedades reductoras exagerando su compacidad por el apisonamiento que puede producir un riego prolongado. Para ello, se ponen en un largo tubo de vidrio, estirado por su parte inferior, un centenar de gramos de tierra y se vierten en la parte superior del tubo 150 centímetros cúbicos de agua. Cuando ésta se ha escurrido, se vierte nuevamente en el tubo y se repite varias veces la operación. Se observa que esta agua, rica en nitratos la primera vez que pasó por el tubo, los pierde poco á poco al cabo de algunas semanas. Esto demuestra que el apisonamiento producido por el paso del agua ha bastado para formar un medio reductor por privación de oxígeno. Esta es una observación importante que permite explicar la desnitrificación en los suelos sumergidos.

Algunos años más tarde, Burri y Stützer (1896) estudiaron los fenómenos de desnitrificación que provoca en el suelo la aplicación de una proporción exagerada de estiércol. Estos autores aislaron de los excrementos del caballo dos microbios. Sembrados separadamente en caldo nitratado, estos microbios no determinaron ninguna reacción: si se siembran juntos, se manifiesta una fermentación. Uno de estos microorganismos es el *Bacterium coli commune*, el otro es una especie nueva: Burri y Stützer la llamaron *B. denitrificans I*; este microbio es aerobio. En esta acción simbiótica, el *B. coli* transformaría el nitrato en nitrito, el *B. denitrificans* descompondría en seguida el nitrito con desprendimiento de nitrógeno gaseoso. Estos mismos autores han aislado de maceraciones de paja un microbio, el *B. denitrificans II*, que, por sí solo, es capaz de descomponer los nitratos y los nitritos con producción de nitrógeno libre. La asociación de los dos bacilos anteriores, por una parte, el *B. denitrificans II*, por otra, provocan igualmente bien la fermentación de un caldo nitratado; pero, si la cantidad de nitrato ofrecida es demasiado grande, la alcalinidad del líquido aumenta hasta el punto de detener toda reacción.

Si las especies asociadas se encuentran en un medio desprovisto de oxígeno, no desprenden nitrógeno gaseoso, se forma solamente ácido nitroso; en presencia de un débil acceso de oxígeno, se produce nitrógeno gaseoso. El *B. denitrificans II* no ejerce su acción reductora más que en ausencia del aire; en presencia de este gas la fermentación queda suspendida, ó á lo menos dificultada. Resulta de esto que, en un suelo bien aireado, este último microorganismo es poco de temer, mientras que las dos especies asociadas pueden destruir los nitratos.

Ampola y Garino (1897) han encontrado en los excrementos de buey un bacilo, el *B. denitrificans agilis*, capaz de descomponer los nitratos con formación de nitrógeno y de gas carbónico. Las materias fecales de los herbívoros están también muy cargadas de microbios reductores: no podemos insistir aquí en las variedades que en ellas han sido descubiertas. He aquí solamente, como información, una de las ecuaciones propuestas para explicar el fenómeno desnitrificador. Ampola y Ulpiani (1898), estudiando la desaparición del azúcar en los cultivos anaerobios de dos bacterias desnitrificantes aisladas por ellos, una de la tierra y otra del aire, han sido conducidos á formular este proceso de la siguiente manera:

$$5\ C^6H^{12}O^6 + 24\ KNO^3 = 24\ KHCO^3 + 6\ CO^2 + 18\ H^2O + 12\ N^2$$

La *naturaleza de la materia carbonada* ofrecida á los microorganismos reductores es de primera importancia.

También, en 1897, Jensen, á fin de explicar ciertos aspectos obscuros de este fenómeno, intentó demostrar que existe una relación entre la acción de las bacterias desnitrificantes y la cantidad de carbono orgánico de que estas bacterias disponen. Según este autor, deberían clasificarse los alimentos carbonados que favorecen la desnitrificación en dos grupos: los que son directamente asimilables, como los ácidos butírico, láctico y cítrico, y los que no pueden ser utilizados más que cuando han sido descompuestos por las bacterias de la putrefacción, como la glicerina, la glucosa y la fécula. Las bacterias desnitrificantes no están dotadas de alguna actividad más que cuando encuentran, al lado de nitratos, una provisión suficiente de compuestos carbonados directamente asimilables.

Pronto veremos la aplicación de este hecho á los fenómenos de desnitrificación en los suelos que se enriquecen artificialmente con un exceso de materia orgánica.

Según Weissemberg (1897), ciertas bacterias que él llama *desnitrificantes verdaderos* tienen el poder, cuando les falta el oxígeno, de tomar este gas de los nitratos. La adición de una cantidad suficiente de oxígeno suspende la desnitrificación; la supresión de este gas lleva consigo la reanudación del trabajo de las bacterias desnitrificantes. El nitrógeno del nitrato se desprende en estado gaseoso, y la base puesta en libertad hace el medio tan alcalino que el microbio no puede desarrollarse en él. Por lo que toca á las bacterias que no destruyen los nitratos más que cuando viven en simbiosis, su modo de operar es diferente. Una de ellas convierte el nitrato en nitrito y la otra descompone á éste haciendo desprender su hidrógeno en estado de libertad.

Los experimentos anteriores, interesantes desde muchos puntos de vista, no explican las sucesivas reacciones que con-

vierten los nitratos en nitrógeno gaseoso; no dan ningún dato respecto del nitrógeno orgánico del medio en que se efectúa la nitrificación. Los que habían publicado, desde 1892, Giltay y Aberson, abrían, sin embargo, una nueva vía. Estos autores toman, como medio de cultivo, dos líquidos que contienen —además de las sales minerales indispensables para el desarrollo de los microorganismos adicionadas de 2 gramos de nitro,—el primero un gramo de asparagina por litro y el segundo un gramo de glucosa, de manera que se disponga en este último caso de un líquido que no contiene otro nitrógeno que el del nitrato. El bacilo, aislado, por los autores, del aire y del suelo, y cultivado en los dos medios citados, tenía mucha semejanza con el *B. denitrificans* de Gayon y Dupetit. En los dos líquidos se observó la desaparición de los nitratos y la de los nitritos, con desprendimiento de nitrógeno. En el primero, que contenía asparagina, se formaba cierta proporción de amoníaco, y el volumen del nitrógeno desprendido correspondía al del que contenía el nitrato añadido. Los experimentos ulteriores de Grimbert han aclarado las diversas fases de este fenómeno.

Fermentos desnitrificantes verdaderos. Fermentos desnitrificantes indirectos.—En los experimentos de Grimbert (1898-1899) se disipan muchas obscuridades que reinaban en los fenómenos que aquí estudiamos. Sin embargo, las conclusiones precisas formuladas por este autor parecen haber sido desconocidas ó mal interpretadas por la mayor parte de los sabios que se han ocupado en este asunto. Expondremos aquí algunos pormenores para poner de manifiesto la importancia de los nuevos hechos dados á conocer en el trabajo á que aludimos, trabajo que explicaremos partiendo del resumen que de él ha dado Bagros *(loc. cit.)*.

Grimbert estudia la acción desnitrificante de dos bacterias muy esparcidas, el *Bacterium coli commune* y el *Bacilo de Ebert (Bacillus typhosus)*. Los nitratos no pueden ser atacados más que *cuando el medio contiene principios amidados*, como los que contiene el caldo de carne. *Es por efecto de la reacción secundaria que el ácido nitroso ejerce*

sobre las amidas que se produce el desprendimiento de nitrógeno libre. Debe decirse *ácido nitroso* y no *nitritos*; éstos no pueden actuar por sí solos en medio neutro ó alcalino.

El autor cultiva los dos microbios precedentes en diferentes medios: 1.º, en agua peptonada al 1 por 100 que contiene 1 por 100 de nitrato. Se observa entonces una reducción parcial del nitrato á nitrito, pero sin desprendimiento gaseoso: 2.º, en caldo de carne de buey peptonado y nitratado al 1 por 100, en cuyo caso se produce un desprendimiento gaseoso abundante. Así, cuando se substituye un medio por otro, hay un cambio profundo en las funciones biológicas de los dos microorganismos que actúan. Grimbert estudia entonces la *naturaleza de los gases* desprendidos, la proporción del nitrato destruído, la relación entre el peso del nitrato destruído y el volumen del nitrógeno desprendido, la proporción de los nitritos que quedan al fin y, por último, el volumen del nitrógeno amidado que da un volumen de caldo igual al que se ha empleado en los experimentos.

El *Bacillus pyocyaneus*, desnitrificante enérgico, fué, además, sembrado en una solución de peptona nitratada, á fin de comparar su acción con la de los dos microbios anteriores, y de ver la diferencia que existe entre estos dos últimos y los fermentos desnitrificantes verdaderos. Grimbert encuentra que el bacilo piociánico no desprende más que nitrógeno puro, sin gas carbónico, mientras que los otros dos desprenden estos dos gases á la vez. Con el bacilo piociánico se produce, sin embargo, gas carbónico, pero, poniéndose en libertad la base del nitrato, este gas es absorbido por ella, y el medio se vuelve muy alcalino; mientras que con los otros dos microbios permanece neutro. En el caso del bacilo piociánico, *el volumen del nitrógeno desprendido es igual al que contiene el nitrato destruído;* es más de siete veces mayor que el que podrían suministrar los principios amidados del caldo. Con el *B. coli* y el *B. typhosus*, la reacción del líquido de cultivo sigue neutra; el volumen del nitrógeno es el doble del que corresponde al nitrógeno del nitrato y sólo la mitad del que sería desprendido por el hipobromito (nitrógeno ami-

dado). Grimbert admite que la mitad de este nitrógeno desprendido procede de los nitratos, y que la otra mitad sólo puede proceder de los principios amidados del caldo; estos principios se descomponen en contacto con los productos de reducción del nitrato por las bacterias, es decir, por el ácido nitroso.

Resulta de estos experimentos que el *B. coli* y el *B. de Eberth* no atacan á los nitratos con el mismo mecanismo que el que emplea el *B. piociánico*. La reducción de los nitratos por éste es atribuíble á los principios amidados: debe deducirse, pues, que si se suministra á la solución de peptona el nitrógeno amidado que le falta, se obtendrá un desprendimiento de nitrógeno. Esto es lo que comprueba la experiencia. Se utiliza, para ello, un medio formado por una solución de peptona al 1 por 100, que contiene 1 por 100 de nitrato y adicionada de 1 por 100 de extracto de carne. Cultivado en este medio, el *B. coli* desprende un volumen de nitrógeno muy superior al que podría dar el nitrato descompuesto. El extracto de carne proporciona al medio los compuestos amidados indispensables para la descomposición del nitrato. Nuevos ensayos confirman este último hecho: si se emplean cantidades crecientes de extracto de carne, la proporción del nitrato destruído aumenta paralelamente á los pesos del extracto añadido al medio.

Grimbert propone, pues, *dividir las bacterias desnitrificantes en dos categorías:* la primera comprende los microbios que, como el *B. pyocyaneus*, atacan directamente al nitrato utilizando el oxígeno de esta sal para quemar el carbono; el gas carbónico que se forma se fija en la base del nitrato que ha quedado libre. La segunda categoría *(B. coli)* comprende los microbios que reducen el nitrato á nitrito; esta reducción se completa con *una acción secundaria* entre el nitrito y los compuestos amidados que contiene el medio de cultivo. Este fenómeno secundario parece resultar de la reacción que se establece entre el ácido nitroso formado por las bacterias y los cuerpos amidados, según la siguiente expresión, en que la urea ha sido tomada como tipo de amida.

$$CO(NH^2)^2 + 2\,NO^2H = 2\,N^2 + CO^2 + 3\,H^2O.$$

Grimbert opina que esta descomposición se produce gracias á la intervención de un ácido formado á expensas de ciertas substancias del caldo. Este ácido neutralizaría la base á medida que ésta se pondría en libertad; á esto se debería la neutralidad del medio.

Los *fermentos desnitrificantes verdaderos* son, pues, aquellos que, como el *B. piociánico*, desprenden el nitrógeno de los nitratos en contacto con una solución de peptona al 1 por 100; los *fermentos desnitrificantes indirectos* sólo determinan un desprendimiento de nitrógeno en presencia de los ácidos amidados del caldo.

Algunos hechos nuevos relativos á la desnitrificación. —Indiquemos, ahora, muy rápidamente las conclusiones de algunos trabajos posteriores á los de Grimbert, pasando en silencio los que, describiendo especies desnitrificadoras nuevas, no dicen nada especial respecto del mecanismo íntimo de la reacción.

Schneidewind hace intervenir, como condición fundamental de la descomposición de los nitratos por los microbios del estiércol ó de la paja, la presencia de ciertas fuentes de carbono: celulosa, fécula, manita, ácidos butírico, cítrico, láctico, etc. Para Marpmann (1899), el gas hidrógeno procedente de ciertas fermentaciones bacterianas sería el agente reductor de los nitratos; se formarían nitritos y sales amoniacales que, reaccionando sobre las amidas y las aminas procedentes de los albuminoides del medio de cultivo, producirían nitrógeno libre. No habría, pues, aquí, más que una serie de reacciones *de orden puramente químico*, capaces de convertir el nitrógeno nitroso y el nitrógeno amoniacal en el estado gaseoso, reacciones que no pueden efectuarse más que en medio ácido. Esta opinión es contraria á los hechos descubiertos por Grimbert en cuanto se refiere á los desnitrificantes directos. Wolf (1899) cree que el primer estadio de reducción conduce á la formación de nitritos, los cuales son descompuestos después por el gas carbónico procedente de la combustión del carbono; la desnitrificación sólo se efectuaría cuando hay un abundante desprendimiento de gas carbónico.

Weissemberg (1902) vuelve á tratar de la división de las bacterias desnitrificantes en bacterias directas é indirectas, establecida cuatro años antes por Grimbert, según acabamos de decir. Este autor opina que, si hay reacción secundaria de los nitritos sobre las amidas contenidas en el líquido de cultivo, es preciso que éste se vuelva ácido. Pues bien, Grimbert había observado ya que, si la intervención de un ácido es necesaria, esta intervención puede efectuarse sin que el líquido deje de permanecer neutro ó alcalino.

Grimbert y Bayard (1909) han precisado el mecanismo de la

acción de las bacterias desnitrificantes indirectas *(B. coli)* de la manera siguiente: Si se cultiva el colibacilo en una solución de peptona al 1 por 100, que contenga 1 por 100 de nitrato potásico, no se desprende nitrógeno: el nitrato sólo se transforma en nitrito, como hemos visto antes. Cuando á la solución precedente se añaden alimentos carbonados, como glucosa, glicerina, sacarosa, ácidos láctico, tartárico (estos últimos neutralizados por la sosa), se encuentra, al cabo de treinta días, la cantidad de nitrógeno original, aun cuando haya habido fermentación activa en ciertos medios. La presencia de hidratos de carbono ó de sales orgánicas no basta, pues, á lo menos en presencia del colibacilo, para la descomposición de los nitratos. Por consiguiente, contra la opinión de Wolf, la desnitrificación no depende de la fermentación de los hidratos de carbono.

Si la solución de peptona nitratada es adicionada de glicocola, urea, asparagina, leucina, tirosina, y luego sembrada con el colibacilo, no se produce desprendimiento gaseoso y, al cabo de treinta días, no se ha destruído el nitrato. Resulta de esto que la sola presencia de materias amidadas ó amónicas no basta para provocar la desnitrificación. Pero, si se añaden *á la vez* á la solución de peptona nitratada un hidrato de carbono y un ácido amínico, se produce inmediatamente una activa desnitrificación, con la condición de que el alimento carbonado sea atacado por el colibacilo. Durante el experimento la reacción permanece neutra ó ligeramente alcalina.

Se pueden sintetizar estos últimos resultados del modo siguiente: La destrucción de un nitrato por las bacterias desnitrificantes indirectas exige la realización de las siguientes condiciones: 1.º, la reducción del nitrato á nitrito; 2.º, el medio de cultivo debe contener á la vez substancias amidadas ó amónicas y alimentos carbonados susceptibles de ser atacados por el microbio suministrando ácidos. En este caso, atacando la bacteria al alimento carbonado da origen á un ácido que reacciona sobre el nitrato y *provoca la reacción del ácido nitroso libre sobre el cuerpo amínico;* entonces se desprenden nitrógeno y gas carbónico. El ácido se combina con el álcali del nitrato y el líquido permanece neutro.

Los hechos que acabamos de exponer explican los resultados que Grimbert había obtenido anteriormente substituyendo el caldo de carne á la peptona, y está permitido pensar que pueden aplicarse á un gran número de bacterias desnitrificantes indirectas.

El mecanismo de la acción de las bacterias indirectas ha sido nuevamente estudiado con detenimiento por Bagros (1910), cuyos trabajos confirman de un modo notable los de Grimbert; la desnitrificación por el colibacilo no se efectúa más que cuando el medio contiene á la vez *cuerpos ternarios susceptibles de fermentar* por la acción del microbio (glucosa, lactosa, ácido láctico, cuerpos con función de alcohol), y ácidos amínicos (glicocola, urea, alanina, gelatina, etc.). La presencia simultánea de estas dos categorías de substancias es indispensable para que se efectúe el fenómeno. Se observa á veces el desprendimiento de una pequeña cantidad de ácido nítrico, pero nunca de óxido nitroso, ni de hidrógeno. El gas carbónico solo es incapaz de expulsar al ácido nitroso.

Franzen y Löhmann (1910) han dado, en la misma época, una clasificación de las bacterias desnitrificantes en tres grupos. En el primero incluyen los microorganismos que producen nitritos y, en pequeña proporción, productos de reducción más avanzados (*Bacillus prodigiosus, Bacterium coli, B. typhii murium*). En el segundo se encuentran los microorganismos que primero dan nitritos, pero que luego reducen rápidamente á estas sales (*B. pyocyaneus*). En el tercero deben admitirse los microorganismos que no atacan á los nitratos. Pero, los citados autores parecen ignorar los resultados obtenidos por Grimbert sobre el mecanismo de la desnitrificación.

Según Pelz (1910), se podrían clasificar los desnitrificadores en *desnitrificadores enérgicos* (*Vibrión colérico, Bacilo tífico de los ratones, Bacillus aerogenes*); *desnitrificadores medios* (*B. typhosus, B. coli*); *desnitrificadores débiles* (estreptococo, estafilococo). Mazé (1911) ha encontrado que los microbios que Winogradsky no había podido separar, en medio líquido, de las bacterias nitrificantes (página 446) son desnitrificantes enérgicos: los unos producen solamente ácido nitroso, los otros forman compuestos oxigenados gaseosos de nitrógeno: son *desnitrificantes aerobios*.

Pasemos ahora al examen de la desnitrificación observada en los medios naturales, y veamos qué consecuencias agrícolas se pueden deducir.

La desnitrificación en el suelo.—El suelo contiene una multitud de bacterias desnitrificantes; la mayor parte de las que han sido empleadas en los anteriores experimentos se encuentran en la tierra. Después de haber estudiado el mecanismo de la reducción de los nitratos, que no podía definirse claramente más que con el empleo de cultivos puros y de medios de composición exactamente conocida, conviene ahora decir algunas palabras sobre los fenómenos, tales como se efectúan en las condiciones habituales de la práctica agrícola.

Existe un hecho notable, fácil, sin embargo, de explicar partiendo de los conocimientos que acabamos de adquirir, es el hecho de la desnitrificación intensa en el suelo en presencia de un exceso de materia orgánica.

Cuando se descubrió la presencia constante de bacterias desnitrificantes en el suelo, un agrónomo alemán, Wagner (1896), demostró que la eficacia del abono de cuadra no estaba en relación con su riqueza en nitrógeno, y supuso que los nitratos, formados por oxidación del amoníaco ó de las materias nitrogenadas del estiércol, eran reducidos por ciertos fermentos que llevaban los excrementos del ganado y, en consecuencia, quedaban perdidos para la vegetación. Wagner mezclaba á diversas muestras de tierra materias animales, como excrementos de caballo ó de buey, estiércol reciente, etc.; abandonaba á sí mismas, como término de comparación, tierras semejantes no adicionadas, é incorporaba un peso conocido de nitrato sódico á estas dos categorías de tierras. Al cabo de algunos días, sometió todas estas tierras á un lavado; pues bien, si se encuentran integralmente los nitratos en las segundas muestras, se observa que estos nitratos han desaparecido en gran parte en las primeras. Las conclusiones que Wagner dedujo de estos experimentos fueron desfavorables al empleo del abono de cuadra, para el cual propuso el empleo de un tratamiento químico preliminar, á fin de asegurar en su masa la destrucción de los organismos reductores que ésta contenía y que eran la causa de la desaparición de los nitratos en el suelo.

El empleo del estiércol como abono era casi universalmente reconocido como muy ventajoso en un gran número de cultivos, y la realización de las ideas de Wagner podrá producir una revolución en la práctica agrícola. Dehérain se ocupó en la cuestión y no tuvo dificultad en demostrar que *sólo el exceso de materia orgánica* incorporada al suelo debía ser recriminado en los ensayos del agrónomo alemán. He aquí algunas explicaciones sobre este punto:

Si se esteriliza una solución de nitrato potásico al 1 por 100 y se le adicionan 0.5 gramos de paja, la reacción de los nitritos aparece al cabo de algunos días. Al cabo de un mes, apenas existe nitrógeno nítrico, y la pérdida de nitrógeno en estado gaseoso es considerable. La adición de estiércol fresco ó de excrementos de caballo, en vez de paja, da el mismo resultado; esto confirma las conclusiones de Wagner: la paja y el estiércol *reciente* contienen fermentos reductores. Pero, si se emplea estiércol *consumido*, la pérdida no se presenta ó, á lo menos, es muy pequeña. Con una gota del líquido en el cual el estiércol ha producido una enérgica reducción se pueden sembrar matraces que contienen, en 300 gramos de agua, 1 gramo de nitrato potásico y 2 gramos de fécula. A los quince días, los nitratos han desaparecido. Esta reducción sólo se efectúa, en este último caso, cuando el líquido contiene fécula; si el nitrato estuviese sólo no sería

reducido. Este fenómeno se atenúa mucho si se hace pasar por los matraces de cultivo una rápida corriente de aire; inversamente, la reducción es muy rápida cuando se mantiene el líquido al abrigo del oxígeno.

¿Cómo se comporta la tierra de labor misma? Cuando se siembra con variadas tierras líquidos que contienen una centésima de nitrato potásico y un poco de fécula, se observa siempre la desaparición de los nitratos. La tierra contiene, pues, fermentos reductores, como ya sabíamos; pero, se exalta su actividad con la adición de fécula. Pues bien, á pesar de su presencia constante en el suelo, estos fermentos, en las condiciones ordinarias, ejercen muy poca influencia, porque la nitrificación—como se observa diariamente— se efectúa de una manera regular. Pero, estos fermentos reductores se vuelven peligrosos cuando están en presencia de ciertas materias carbonadas fáciles de fermentar.

Si, ahora, se hace el experimento con mezclas de tierra de labor y de estiércol, he aquí lo que se observa: A 2 kilogramos de tierra se incorporan de 200 á 400 gramos de excrementos de caballo y una cantidad conocida de nitrato potásico. Después de algunos días, se lavan las muestras para determinar los nitratos y se observa que, si en los ensayos mantenidos á la temperatura ordinaria la pérdida de nitrógeno en estado gaseoso es poco marcada, esta pérdida, por el contrario, es muy notable cuando el ensayo se ha hecho elevando la temperatura á 30°. Las ideas emitidas por Wagner son exactas; pero, como hace notar Dehérain, las proporciones de 200 y 400 gramos de abono para 2 kilogramos de tierra equivaldrían, en la práctica agrícola, al empleo, por hectárea, de 400000 y 800000 kilogramos de abono de cuadra. Esta cantidad es excesiva; es diez y veinte veces mayor que la mayor proporción empleada, aun en los casos de una fuerte estercoladura. Si se mezcla con un peso conocido de una buena tierra de labor una cantidad de estiércol hasta doble de la que ordinariamente se aplica, no sólo no son reducidos los nitratos, sino que la nitrificación sigue su marcha regular. Por lo tanto, las bacterias desnitrificantes no ejercen su funesta acción más que en presencia de enormes cantidades de materia orgánica que nunca se emplean en la práctica agrícola. Además, si la fécula, como se ha dicho antes, constituye un alimento preferido por las bacterias de la desnitrificación, este hidrato de carbono no existe en los excrementos animales: la fécula siempre es digerida. Se ha pensado que las *pentosanas*, y especialmente la *xilana*, que ordinariamente se encuentran en el estiércol no consumido, podían proporcionar á los microorganismos reductores un alimento hidrocarbonado semejante á la fécula de los anteriores experimentos. Pero, las fermentaciones que se desarrollan en la masa del estiércol en montón destruyen casi la totalidad de la xilana; tampoco el *estiércol hecho*, que es el que generalmente se aplica al suelo, presenta ninguno de los inconvenientes atribuídos al *estiércol reciente*.

En la misma época en que se hacían estos trabajos, Warington (1897) llegaba á una conclusión análoga: la desnitrificación producida por los microorganismos reductores transportados por los excrementos debe ser atribuída á una cantidad exagerada de materia carbonada. Es muy verosímil que esta exagerada proporción retarde la oxidación regular del nitrógeno amónico y hasta llegue á detenerla. Resulta de esto que un medio, ordinariamente favorable á la nitrificación, puede, temporalmente, convertirse en un medio reductor, porque es quitado el oxígeno á los nitratos preexistentes.

Pero, el empleo de *un estiércol consumido*, que introduce en el suelo una materia que fermenta con mucha más lentitud, no puede, según la experiencia, presentar los mismos inconvenientes. Además, Dehérain hace observar que la destrucción previa de los microorganismos en la masa del estiércol antes de esparcirlo no presentaría ventaja alguna, porque la cantidad de materia orgánica aplicada seguiría siendo la misma y porque los microbios desnitrificadores viven ordinariamente en el suelo.

En resumen, las conclusiones formuladas por Wagner son verdaderas cuando se trata de la incorporación á la tierra de labor de masas considerables de materia carbonada. Pero, la cantidad de ellas, que generalmente se emplea, es incapaz de causar una desnitrificación: los fenómenos oxidantes de una nitrificación regular son entonces lo normal.

La diferencia entre la manera como ciertos microbios desnitrificantes se comportan en un líquido de cultivo ó en un suelo muy húmedo, por una parte, y por otra en una tierra moderadamente húmeda y bien aireada, procede sobre todo de la proporción variable de oxígeno contenido en estos dos diferentes medios: escasa ó nula en el primero, abundante en el segundo, favorece ó dificulta la desnitrificación (Koch y Petit, 1910).

De las nociones que preceden se puede deducir la siguiente conclusión, relativa *al empleo simultáneo del estiércol y los nitratos* que reclaman ciertos cultivos.

Según Ampola y Ulpiani (1903), si se quieren evitar las pérdidas de nitrógeno, durante el período regular de la nitrificación, no se deben aplicar al suelo abonos de cuadra recientes ó ricos en paja. Si el cultivo de que se trata exige la aplicación de nitratos, no deberán aplicarse hasta después

de la completa descomposición del estiércol en la tierra. En los suelos turbosos, los nitratos son rápidamente destruídos con formación de amoníaco y de nitrógeno libre.

Además, y no se insistirá demasiado sobre este punto, si la *cantidad* de materia orgánica aplicada á un suelo en vía de nitrificación puede determinar un paro y aun una retrogradación en ésta, la *calidad de esta materia*, es decir, sus propiedades nutritivas respecto de los microorganismos, desempeña también un papel muy importante.

Humedad de las tierras y desnitrificación. — Si bien la actividad de los fermentos desnitrificantes es exaltada en un suelo muy húmedo, á causa de la pobreza de la atmósfera en oxígeno ó hasta de la ausencia de este gas, existe, en cambio, una condición opuesta que también favorece la desnitrificación.

Giustiniani (1901) ha suministrado sobre este punto algunos datos cuyas conclusiones son las siguientes. Si se forman medios arenosos artificiales que se dividen en dos series, y á los cuales se incorpora, en la primera serie sulfato amónico y, en la segunda, nitrato sódico (se tomaron estas dos sales en cantidades que contuvieran la misma cantidad de nitrógeno á igualdad de peso); si. luego, se siembran todos estos medios con un poco de tierra, he aquí lo que se observa á la temperatura ordinaria, haciendo variar la proporción de humedad desde 0 hasta 16 p. 100. La energía de la nitrificación del sulfato amónico es directamente proporcional á la proporción de humedad. La desnitrificación del nitrato sódico, aunque muy débil, no es apreciable más que cuando la proporción de humedad es inferior á cierta cifra. Cuando se experimenta con tierra de labor en las mismas condiciones que acaban de indicarse, la desnitrificación es manifiesta cuando la proporción de humedad es inferior á 6 p. 100. Esta proporción no basta para el sostenimiento de los fermentos nitrificadores. Pero, éstos recobran rápidamente el predominio cuando la humedad asciende á 10 p. 100; con 16 p. 100 su acción alcanza el máximo. Por lo que se refiere á los fermentos desnitrificadores, la pequeña proporción de 4 p. 100, y á veces de 2 p. 100 de agua, representa el límite que permite á éstos manifestar su actividad, la cual no es entonces dificultada por la de los fermentos que trabajan en sentido contrario. Cuando la proporción de humedad es 0, toda vida microbiana queda suspendida; si la proporción es débil, próxima á los límites que hemos señalado, la desnitrificación es proporcional á la riqueza del medio en materia orgánica:

esto es lo que resulta de la observación hecha en dos tierras, igualmente cargadas de humus, la una con 4,2 p. 1000 y la otra con 18,03 p. 1000 de carbono orgánico. El máximo de actividad de los fermentos desnitrificantes se presenta á una temperatura bastante baja, incompatible con el desarrollo normal de los fermentos nitrificadores.

Resulta de lo que precede, que la intensidad de los fenómenos de reducción de los nitratos, depende de tres factores cuyo sentido acaba de definirse: *humedad, temperatura, proporción de materia orgánica. En los medios líquidos,* el óptimo de actividad de los fermentos desnitrificadores está situado á unos 40-42°; esta temperatura elevada es ya desfavorable á la nitrificación.

Aguas de cloacas y desnitrificación — Si los fenómenos de desnitrificación en el suelo tienen gran importancia práctica, y si pueden ser evitados en parte, según las indicaciones que antes hemos hecho, estos mismos fenómenos son muy interesantes en su estudio, cuando se trata de la purificación de las aguas de las cloacas. Es evidente, *a priori,* que la masa flúida de materia orgánica que constituye las aguas sucias, forzosamente poblada de los más diversos microorganismos, debe ser un medio donde se efectúen fermentaciones de toda clase. En el curso de su purificación por capas ó lechos bacterianos, las aguas de las cloacas desprenden una muy notable cantidad de nitrógeno gaseoso, según se deduce de un trabajo reciente de Müntz y Lainé (1911).

Esta pérdida llega á ser de 50 á 60 p. 100; hasta puede alcanzar al 70 p. 100, y se observa una correlación entre la proporción de materia orgánica existente y la pérdida de nitrógeno. Cuando la materia orgánica falta y la totalidad del nitrógeno se halla en forma amoniacal, la pérdida de nitrógeno es nula ó despreciable. Si, pues, no existiesen en la masa más que microbios nitrificadores, éstos no determinarían un desprendimiento de nitrógeno libre: lo que demuestra que estos microbios no son los únicos que producen la purificación.

Cuando las aguas de las cloacas han pasado por las capas bacterianas, dan, por término medio, para 100 partes de nitrógeno preexistente: nitrógeno nitrificado 30 á 35, nitrógeno gaseoso 55 á 60. Desde el punto de vista de la destrucción de la materia orgánica, los agentes ordinarios de la combustión son los que actúan con más eficacia.

A pesar de la aereación de las capas bacterianas, hay reducción

apreciable de los nitratos formados; se produce, pues, una pérdida de nitrógeno, pero esta pérdida es, sin embargo, muy inferior á la que resulta de la combustión directa de las materias orgánicas y del mismo amoníaco. Cuanto más abundante es la materia carbonada, más enérgica es la reducción. El nitrógeno de los nitratos no engendra materia orgánica nitrogenada, ni amoníaco. Los microorganismos se limitan á tomar el oxígeno del ácido nítrico, sin utilizar el nitrógeno; la reducción es completa, porque no se forman nitritos. Pero, al abrigo del aire, primero se forman nitritos, sobre todo á baja temperatura. Se ve, pues, cuán complejo es el fenómeno de la transformación del nitrógeno orgánico de las aguas de las cloacas, y cuán grande debe ser el número de los agentes microscópicos dotados de variadas funciones que intervienen en este proceso: las condiciones exteriores de aereación y de temperatura regulan, en parte, el sentido de las reacciones.

VI

VENENOS DEL SUELO

Posibilidad de la intoxicación del suelo. — El estudio biológico del suelo que acabamos de exponer sumariamente nos lleva á deducir que la mayoría de los microorganismos que viven en la tierra de labor trabajan generalmente en sentido favorable á la vegetación. En las condiciones normales de un buen suelo aireado y convenientemente trabajado, unos microbios queman la materia carbonada y devuelven al medio ambiente el agua y el ácido carbónico, otros simplifican la molécula nitrogenada de origen albuminoide poniendo en libertad nitrógeno amoniacal, otros oxidan á este último y producen nitratos. Los microbios perjudiciales, si así pueden llamarse los desnitrificadores, sólo actúan cuando la tierra de labor se halla, de una manera temporal ó definitiva, sometida á influencias que contrarían ó anulan la actividad de los seres de la primera categoría. A menudo se puede luchar contra estas influencias nefastas, saneando el suelo, aireándolo mediante buenas labores, proporcionándole ciertos agentes químicos como la cal: en una palabra, favoreciendo lo más posible los fenómenos de oxidación.

Otra cuestión se nos presenta ahora. ¿No podría ocurrir, á la larga, que un vegetal, aun cuando disponga de suficiente cantidad de materias nutritivas, sufriese una decadencia á causa de la presencia de substancias fijas ó volátiles que excretase á su alrededor, aun en pequeñas cantidades, ó á causa de materias tóxicas procedentes del suelo en que se desarrolla, como, por ejemplo, ciertos productos de putrefacción que se formasen en la tierra á expensas de las numerosas materias orgánicas que ella contiene? *A priori*, nada se opone á esta opinión. Puede haber intoxicación de la planta por efecto de la existencia, á veces pasajera, de una materia que infecte las disoluciones que la planta tomaba del suelo: ésto podría llamarse una *intoxicación interna*. Pero también es admisible el hecho de una *autointoxicación* del vegetal, debida á ciertos productos más ó menos volátiles, que éste emitiría constantemente á la tierra y cuya presencia, al cabo de un tiempo variable, repercutiría en su vitalidad determinando el paro del crecimiento.

No se trata aquí de los desórdenes que provocaría en la planta la existencia en el suelo de parásitos animales ó vegetales capaces de oponerse á su desarrollo, ó de la presencia de cuerpos evidentemente tóxicos, como las sales de zinc, de plomo ó de mercurio, esparcidas en un sitio por casualidad ó intencionadamente para destruir parásitos peligrosos. No se trata tampoco de la presencia, en un lugar determinado, de un abono soluble, ordinariamente útil para la vegetación, pero cuya concentración momentánea podría resultar nociva para la evolución de la planta, mientras una dilución conveniente no hubiera llevado la sal á un estado en que pudiera ser absorbida sin peligro por las raíces. Entonces intervienen razones de orden osmótico para plasmolizar la célula y ocasionar la muerte. Respecto de esto, sabido es lo perjudicial de la acción de la sal marina que el agua del mar lleva consigo: la mayor parte de los vegetales no resisten al agua salobre. Este exceso de sal sólo desaparece por la acción de las lluvias prolongadas; y si por una ú otra causa la sal marina invade nuevamente un terreno, ya sea por llegar por la superficie, ya por efecto de acciones capilares que la hacen subir de las capas inferiores, todo cultivo se hace imposible. Las sales magnésicas solubles, aunque no estén más que en un ligero exceso, son también tóxicas. Las tierras ácidas (turberas) no son capaces más que para plantas de poco valor desde el punto de vista alimenticio; el exceso de acidez produce efectos análogos á los que se observan en presen-

cia de ciertas sales. La oxidación del sulfuro de hierro, bastante común en muchas turberas, engendra ácido sulfúrico, cuya concentración, aun en pequeñas proporciones, es un obstáculo absoluto para el desarrollo de la mayoría de las plantas.

Volvamos ahora á las substancias tóxicas que no proceden de la introducción de las sales minerales en el suelo y que pertenecen probablemente á la serie de las *ptomaínas* y de las *toxinas* de origen celular ó microbiano.

Conviene, á propósito de esto, hacer las siguientes consideraciones. Se debe pensar que la planta se comporta como el animal, en cuyo organismo, aun en estado normal, hay producción constante de substancias tóxicas, de las cuales se encuentran, principalmente en la orina, leves indicios, pero cuya cantidad aumenta durante diversos estados patológicos. La respiración animal va siempre acompañada de la emisión de productos tóxicos volátiles, á los cuales se deben atribuir ciertos fenómenos nerviosos observados en animales encerrados en un local limitado, saturado de vapor de agua, sin que sea posible dar la culpa de las perturbaciones observadas á la presencia del gas carbónico. Muchas observaciones demuestran que la respiración vegetal tiene, en este concepto, estrechas analogías con la respiración de los animales. Berthelot (1889) ha hecho notar que, si se ponía tierra húmeda debajo de una campana, esta tierra despedía indicios de amoníaco y de compuestos nitrogenados volátiles, que se disolvían en el agua que se condensaba en las paredes de la campana. Cuando en esta tierra hay plantas, ocurre el mismo fenómeno.

Fatiga del suelo.—La *intoxicación del suelo,* ó la *fatiga del suelo,* como frecuentemente se dice, hace mucho tiempo que fué observada. Sabido es que ciertas plantas, particularmente las leguminosas, rehuyen prosperar indefinidamente en la misma porción de tierra. Tal ó cual vegetal no deberá reaparecer en la tierra que lo nutría hasta que haya transcurrido un tiempo igual al que allí vivió; y esto, cualesquiera que sean las labores que se hayan dado al suelo para airearlo y cualquiera que sea la naturaleza de los abonos empleados. Sin embargo, esta intoxicación del suelo por la planta es difícil de comprender, y muchos autores han negado su realidad: en efecto, ¿por qué estas toxinas serían nocivas para la planta que las ha producido y no para otras plantas capaces de desarrollarse normalmente en el mismo suelo en que las primeras languidecen á causa de la intoxicación que sufren? A veces se puede dar la culpa al agotamiento

de las tierras en substancias nutritivas, y la supuesta fatiga del suelo, en el caso del cultivo del trébol especialmente, debe ser atribuída, según Kossowitch (1906), á una falta de ácido fosfórico y, más raramente, de potasa. Algunos suelos muy ricos en nitrógeno también se opondrían á este cultivo.

Pero, si esta pobreza relativa del suelo en elementos minerales desempeña un papel evidente, donde ha sido debidamente observada, existen también casos en que este factor no puede ser el único que debe ser tenido en cuenta. De todos modos, en ciertos casos se obtienen buenos resultados reinoculando simplemente el suelo con un cultivo de bacterias adaptadas á la especie de leguminosa que se cultiva.

A pesar de todo, existen plantas que son capaces de vegetar mucho tiempo en el mismo suelo: los famosos experimentos de Lawes y Gilbert sobre el cultivo del trigo lo demuestran sobradamente. Es superfluo hacer notar que el suelo de los bosques lleva siempre la misma vegetación: se ha emitido la idea de que las micorhizas que recubren las raíces de la mayor parte de los árboles los protegen contra toda infección.

Este problema de la intoxicación del suelo constituye el objeto actual de numerosas investigaciones, sobre todo de parte de los agrónomos americanos, entre los cuales debe citarse principalmente á Milton Whitney. Sin duda, esta intoxicación es frecuentemente una realidad; pero, á fuerza de querer buscar la causa del fenómeno en la presencia, á veces hipotética, de materias venenosas, se ha llegado, con demasiada frecuencia, á prescindir de la influencia de ciertos factores extraños en este problema. Se ha pretendido, por ejemplo, que, debajo del abundante follaje de los grandes árboles, ninguna vegetación era posible. Pues bien, esta ausencia de vegetación, que á menudo se observa, no es en modo alguno un hecho absoluto. Cuando el follaje del árbol abunda y la luz solar penetra difícilmente hasta la tierra, no debe sorprender la rareza ó la falta de vegetación de plantas pequeñas. Además, la *calidad luminosa* de los rayos de la luz blanca, modificada por su paso á través de las superficies verdes del árbol, debe ser tomada en consideración. Las coníferas (pinos, abetos) dejan caer cada año una considerable cantidad de hojas aciculares muertas, impregnadas de resina y cuya humificación es, por este motivo, muy lenta. Existe, pues, debajo de estos árboles una especie de fieltro grueso de una materia difícilmente putrescible que

se opone al desarrollo de las pequeñas plantas, tan frecuentes y variadas debajo de otros árboles.

La exageración de las influencias tóxicas ha llevado á ciertos autores á defender la idea de que el empleo de los abonos estaba destinado, menos que á alimentar á las plantas, á destruir en el suelo las materias venenosas por ellas producidas. Esta opinión nos parece difícil de sostener, y las pruebas experimentales que se han dado á veces sobre este asunto son bastante frágiles. Sin embargo, la cuestión merece ser estudiada á fondo: volveremos á ocuparnos de ella más adelante.

Se sabe que la adición á ciertos suelos de sales de hierro, ó mejor de manganeso, produce un aumento notable en la cosecha. Que estas sales metálicas desempeñan el papel de *cofermentos* en la constitución de ciertas diastasas cuya acción refuerzan ó provocan, es cosa que no puede negarse, especialmente después de los trabajos de G. Bertrand. Pero, se puede preguntar también si estas sales—á las cuales se podrían añadir las sales de zinc y el ácido bórico, capaces en indicios de estimular la vegetación—no intervienen de un modo más ó menos directo en calidad de *antitóxicos*.

Sea lo que fuere, la fatiga del suelo es un hecho de observación corriente. He aquí un ejemplo señalado por Pouget y Chouchak (1907):

Se lixivian con agua destilada de 60 á 80 kilogramos de tierra procedente de un viejo campo de alfalfa. Se evapora el líquido á sequedad á baja temperatura (40°), y se divide el extracto obtenido en dos partes. La una se incorpora á una tierra que nunca ha dado alfalfa; la otra se calcina, y las cenizas resultantes de la calcinación se mezclan con una igual cantidad de la misma tierra. Se reparten en macetas idénticas 5 kilogramos de estas muestras y, además, se pone como testigo una maceta igual llena de la misma tierra, pero sin adición alguna. Cada maceta recibe la misma cantidad de agua y el mismo número de semillas de alfalfa previamente germinada. El experimento, seguido durante cuatro años, ha permitido demostrar que el *extracto acuoso de tierra de alfalfa calcinado* no ha actuado sensiblemente en la vegetación, á pesar de poner á disposición de ésta cierta cantidad de materias salinas. El *extracto acuoso no calcinado* ha producido siempre una disminución en la cosecha que no puede

ser debida, por consiguiente, más que á materias orgánicas que el extracto contenía.

Debe deducirse de estos ensayos que la acción tóxica del extracto de tierra de alfalfa verosímilmente no procede más que de secreciones de la misma alfalfa. En realidad, como expondremos pronto, existen en ciertas tierras substancias tóxicas aislables. Dumont y Dupont (1907) han demostrado que se podría rejuvenecer una tierra de alfalfa, ya aireándola fuertemente, ya enriqueciéndola con diversos abonos; la materia húmica parece tener en este caso gran eficacia. Se obtienen aún resultados mejores añadiendo 10 por 100 de una tierra en que nunca se hayan cultivado leguminosas. Los citados autores creen que la influencia microbiana no debe ejercerse aquí.

Substancias tóxicas aisladas del suelo.—Han sido aisladas del suelo algunas substancias cuya toxicidad respecto de las plantas ha sido comprobada. Schreiner y Shorey (1908) han encontrado en una tierra rica en sales minerales, pero estéril, de Takoma Park, pequeñas cantidades de *ácido picolincarbónico* (metilpiridincarbónico $CH^3 C^5 H^3 N.CO^2H$). Este ácido ejerce una acción tóxica sobre los granos del trigo; pero, en pequeñas dosis, desempeña el papel de estimulante, como ocurre á menudo con muchos venenos. A la dosis de 1 á 2 diezmilésimas en el suelo esta acción tóxica es muy marcada.

Estos mismos autores han aislado en algunos suelos estériles el *ácido dioxiesteárico* $C^{18} H^{36} O^4$. En una tierra del Tennessée, se habrían encontrado 0,05 gramos por kilogramo de tierra. La toxicidad de este cuerpo es notable á la dosis de $^1/_{50000}$; muy notable á la de $^1/_{10000}$ para los trigos jóvenes. El ácido dioxiesteárico obtenido artificialmente se comporta de la misma manera. La presencia de este ácido puede comprenderse del modo siguiente: El ácido oleico forma parte integrante de la grasa que contienen muchos vegetales; entra también en la molécula de muchas lecitinas vegetales. El ácido nitroso que convierte el ácido oleico en ácido elaídico se encuentra en el suelo, ya procedente de la desnitrificación, ya constituyendo un anteproducto de la nitrificación. En cuanto á la oxidación del ácido elaídico, puede efectuarse por intermedio de diversos agentes: aire, enzimas de las raíces, microorganismos.

La existencia del ácido dioxiesteárico en muchos suelos estériles ha inducido á Schreiner y Lathrop (1911) á buscar si existía una relación entre la presencia de este ácido y la esterilidad de las tierras. Estos autores han examinado respecto de este punto 84 suelos (60 muestras tomadas en la superficie y 24 del subsuelo). En una tercera parte de los casos han podido comprobar la existencia de este ácido. Los 60 suelos propiamente dichos se dividen en dos categorías: 1.°, *buenos suelos*, es decir, los que tienen una fertilidad satisfactoria ó media; 2.°, *suelos pobres*, esto es, los suelos poco fér-

tiles ó estériles. En los 25 suelos que formaban los de la primera categoría, no se ha encontrado más que dos veces el ácido dioxiesteárico, mientras que se le ha encontrado en 18 muestras de la segunda categoría, que comprendía 35. Cuando un suelo es marcadamente estéril, puede comprobarse en él la presencia del ácido, y esto en las más diversas localidades. Por esto Schreiner y Lathrop consideran que la investigación de este ácido ofrece alguna ventaja cuando se trata de comprobar el valor agrícola de una tierra.

En algunos suelos se ha encontrado el *ácido α-oxiesteárico* $C^{18} H^{34} O^{3}$, cuya presencia podría atribuirse á la reacción del ácido nitroso sobre algunos ácidos amínicos. También se ha podido caracterizar el *ácido lignocérico* $C^{24} H^{48} O^{2}$, cuya formación sería explicable por la acción de ciertos microorganismos sobre los tejidos leñosos.

Schreiner y Sullivan (1909) han encontrado en un suelo, en el que se habían cultivado habas durante largo tiempo, una substancia cristalina, venenosa para las plantas. Este suelo se había vuelto ácido y la planta se negaba á vegetar en él; despojado por loción de este producto tóxico, fué nuevamente apto para que la planta se desarrollase en él. Independientemente de las materias que acabamos de mencionar, Schreiner y Shorey han aislado del suelo carburos parafénicos, una colesterina especial, la *agrosterina*, no tóxica, *arginina, histidina*, derivados pirimídicos, bases púricas (xantina, hipoxantina).

¿Se puede anular ó disminuir la toxicidad de algunas de estas substancias? Resulta de muchos ensayos, hechos por Schreiner y Reed (1908) con plantas cultivadas en soluciones acuosas, que la toxicidad de algunas substancias orgánicas añadidas intencionadamente (vainillina, cumarina, arbutina) disminuye en contacto de las raíces vivas hasta cierto punto, cuando la concentración inicial de la solución no es bastante elevada para dañar al vegetal. Parece que el *poder oxidante de las raíces* desempeña en el fenómeno un papel notable; las raíces sanas se defenderían por sí mismas. Por otra parte, á propósito de esta defensa se han emitido ciertas hipótesis en que se hace intervenir la destrucción, por microbios bienhechores, de microbios nocivos que penetran en la raíz.

La adición de materias fertilizantes (nitrato sódico, carbonato cálcico) combate, en cierta medida, la influencia nefasta de las substancias tóxicas presentes, y coopera, con la actividad fisiológica del vegetal, á su destrucción. De donde deriva la opinión, formulada por muchos autores, de que *la influencia bienhechora de los abonos salinos se ejerce principalmente respecto de los venenos orgánicos del suelo*. El empleo de algunos antisépticos enérgicos —capaces de destruir no sólo los parásitos peligrosos (nematodos), sino también de neutralizar las toxinas del suelo (sulfuro de carbono, cloroformo, éter, fenol, cresol, etc.)—ha dado en muchos casos buenos resultados. Según Milton Whitney, los suelos se despojan de sus

toxinas por el hecho de la humificación de la materia orgánica que contienen.

No podría negarse que, entre las causas de esterilidad parcial ó total de las tierras de labor, debe ponerse frecuentemente, en primer término, la falta ó la insuficiencia de elementos minerales indispensables: por esto se ve que vuelve la fecundidad á una tierra á la que se aplica con acierto tal ó cual substancia nutritiva escasa ó que faltaba del todo. Una planta que dispone de alimentos apropiados podrá luchar con ventaja contra las influencias desfavorables que le oponen los medios en que vive y triunfar en esta lucha, como ocurre en el animal en equilibrio fisiológico. Pero, la demostración directa *de la neutralización de los venenos del suelo* por una sal mineral no resulta forzosamente del hecho de que la adición de esta sal al suelo permita á la planta desarrollarse normalmente.

En cuanto al *origen* de los venenos del suelo, es ciertamente múltiple. Pueden proceder de la misma planta, es decir, de ciertas *secreciones de las raíces;* además, muchos parásitos animales y vegetales y microorganismos elaboran toxinas: este conjunto de reacciones conduce verosímilmente á un envenenamiento más ó menos lento del suelo. También es posible que, en muchos casos, la introducción de estiércol en una tierra, con las numerosas especies microbianas que le acompañan, constituya una fuente de productos de putrefacción, algunos de los cuales están dotados de toxicidad.

Resumiremos esta discusión de la manera siguiente:

Parece que la *fatiga del suelo* debe ser atribuída, bastante á menudo, á substancias especiales, producidas unas por el funcionamiento fisiológico mismo del vegetal y formadas otras en el suelo por la acción de ciertos microbios sobre los restos, muy diversos en cuanto á su composición, de las materias orgánicas íntimamente mezcladas con los elementos minerales de la tierra. Estos venenos, de origen microbiano, pueden oponerse á toda vegetación ó, á lo menos, retardar el desarrollo de la planta. La aereación del suelo por medio de labores frecuentes, la adición de las materias salinas que faltan ó que se hallan en cantidad insuficiente, restablecen el funcionamiento normal de la actividad vegetal. El alejamiento de las substancias tóxicas, por lavado ó por esterilización, que coincide con el retorno de la fertilidad, demuestra la realidad de la presencia de las toxinas, sin que se pueda afirmar, hasta nueva orden, que la adición de una sal determinada actúe directamente sobre el suelo como un contraveneno.

Existe una práctica que ofrece muchas ventajas cuando se quiere luchar contra la intoxicación del suelo. La *alternativa de los cultivos* en una tierra permite, en efecto, en las plantas escardadas, limpiar la superficie mediante binas que se oponen al desarrollo de las malas hierbas y que, en cierta medida, destruyen una multitud de parásitos animales ó vegetales.

CAPÍTULO XII

APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LA CONSTITUCIÓN QUÍMICA Y BIOLÓGICA DE LOS SUELOS. AGUAS DE INFILTRACIÓN

Importancia del estudio de las aguas de infiltración.—Substancias solubles contenidas en las aguas de infiltración.—Pérdidas por infiltración.—Cantidades de agua de lluvia que caen en una superficie determinada.—Riqueza de las aguas de infiltración en elementos fertilizantes.—Pérdidas de nitrógeno nítrico en las condiciones naturales.—Cultivos alternados.

I

IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LAS AGUAS DE INFILTRACIÓN (1)

En la exposición que hemos hecho del estudio de la constitución química de la materia mineral de los suelos (capítulo VII, pág. 217) hemos examinado la naturaleza de las disoluciones contenidas en la tierra de labor. Hemos explicado por qué procedimientos se podían aislar los líquidos que mojan normalmente las partículas térreas con su grado real de concentración é indicado las consecuencias que deben sacarse de su presencia desde el punto de vista de la nutrición vegetal. Nos falta ahora estudiar lo que ocurre cuando

(1) En este capítulo no se tratará más que de las aguas de infiltración en concepto químico, por haber sido objeto la práctica del *drenage* de un excelente trabajo de los Sres. Risler y Wery, publicado en la *Encyclopédie agricole* (*Irrigations et drainage*, 2.ª edición, París, 1909).

el suelo recibe, con las lluvias, una superabundancia de agua capaz de atravesarlo en todo su espesor. Se da el nombre de *aguas de infiltración (eaux de drainage)* á las aguas que se infiltran á través del suelo y que se escurren por conductos artificiales ó por los conductos naturales, es decir, los ríos. Su estudio completo no podía ser emprendido con provecho más que después del estudio de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Cuando se analiza el agua que ha atravesado en su espesor un peso algo regular de una buena tierra de labor, y cuyo excedente ha sido recogido en la parte inferior de la alargadera en que la tierra estaba contenida, se observa, como hemos dicho ya en la página 223, que existen en cierto modo dos categorías de substancias en disolución en el líquido. Las unas son relativamente abundantes: cal, ácido nítrico, sosa, ácido sulfúrico: las otras abundan menos ó no se encuentran más que en indicios: potasa, sílice, magnesia, cloro, ácido fosfórico, amoníaco.

Se deduce de esto que, si la masa de aguas pluviales que atraviesa la tierra es algo considerable, al sufrir este lavado la tierra perderá algunos de los principios capaces de suministrar al organismo vegetal un elemento indispensable (nitrógeno nítrico), ó alguna substancia apta para desempeñar en la tierra un papel físico ó químico importante (cal). Resulta de estas consideraciones preliminares que el estudio del volumen y de la composición de las aguas que filtran á través del suelo es de gran importancia práctica porque permite apreciar, por una parte, la intensidad y la naturaleza de las reacciones químicas y microbianas que se efectúan en el suelo y, por otra parte, la cantidad de materias fertilizantes perdidas en un período de tiempo determinado, materias que será necesario devolver al suelo si se quiere mantener en él cierto grado de fertilidad.

Principales cuestiones que suscita el examen de las aguas de infiltración. α. AGUAS PLUVIALES; AGUAS DE INFILTRACIÓN.—Fijemos, de una manera general, la naturaleza de los problemas que se nos presentan en este género de

investigaciones. El examen de las aguas de infiltración requiere *a priori* el estudio de algunos fenómenos.

En primer lugar, se observa corrientemente que la cantidad de agua de lluvia que cae en el suelo es extremadamente variable de un punto á otro del globo.

Existen en nuestro planeta localidades donde casi nunca llueve. La lluvia es nula, ó casi nula, en grandes extensiones entre el Perú y Chile; las aguas pluviales del Sahara son insignificantes. En el Sur de California, el agua de lluvia no representa más que una capa de 60 milímetros por año. En la inmensa región comprendida entre el mar Caspio y la Manchuria, el sud de Siberia y el Tibet, la altura de la capa de agua de lluvia es muy pequeña.

Por el contrario, existen regiones en que la altura de esta capa pasa de 3 metros por año (interior de las Guayanas, fondo del golfo de Guinea, Borneo, costa meridional de Java, etc.). En Sierra-Leona, en el Camerón, la altura de la capa de lluvia es de más de 4 metros; llega á 5 metros en las costas de Birmania. Por último, en el fondo del golfo de Bengala existe una estación, situada á 1200 metros de altitud, que recibe más de 12 metros de agua.

En Francia se observan notables variaciones en la cantidad de agua que cae anualmente en las diversas regiones. En algunos puntos de las comarcas del mediodía caen menos de 500 milímetros de agua; en los sitios elevados (Alpes, Jura, Vosgos, Auvernia, Morvan, Cévennes, montes de Arrée en Bretaña) la caída anual de agua pasa frecuentemente de 1500 milímetros.

En la misma región, dos puntos, situados á algunos kilómetros de distancia, reciben masas de agua muy desiguales. No hemos de definir aquí las causas de estas variaciones; nos basta hacer constar el hecho. Además, en un punto determinado, el volumen del agua pluvial caída difiere esencialmente de un año á otro, á lo menos en muchos casos.

Entre los factores que influyen en la cantidad de agua recogida en los conductos de las aguas de infiltración *(drains)*, debe considerarse por de pronto la permeabilidad del suelo. Si éste deja pasar fácilmente los líquidos, la cantidad de agua recogida será mayor que si se trata de un suelo menos permeable. Además, la totalidad del agua que cae en una superficie de tierra determinada no atraviesa esta tierra: una parte desaparece por evaporación, y esta fracción es tanto mayor cuanto más elevada sea la temperatura exterior. Recíprocamente, durante los meses de invierno, la relación entre el agua que filtra á través del suelo y la que cae en su superficie es mucho mayor que durante el período caliente del año, á causa de ser menor la evaporación en el primer caso.

Se comprende que la permeabilidad del suelo considerado desem-

peña un papel importante en lo que se refiere á la relación entre el agua que lo atraviesa y la que recibe. Si el suelo es muy permeable, el agua pluvial se infiltra pronto y se substraen así á la evaporación cantidades de líquido tanto mayores cuanto más rápido es el paso del agua á través de la masa de tierra, é inversamente (1).

β. SUBSTANCIAS SOLUBLES EN LAS AGUAS DE INFILTRACIÓN; INFILTRACIÓN Y NITRIFICACIÓN.—Otra cuestión se presenta en el estudio de las aguas de infiltración. Puesto que la temperatura del aire, y la del suelo que de ella depende, ejercen una influencia muy marcada en la fracción del líquido que filtra, y que esta fracción no puede ser la misma en las diferentes estaciones, *la composición química* de las aguas de infiltración debe variar en las diversas épocas del año.

Existe un fenómeno cuya importancia es dominante en el presente caso, el fenómeno de la *nitrificación*. Hemos visto antes que *los nitratos no eran retenidos por el poder absorbente*, y que un lavado algo prolongado basta para separarlos en totalidad. Pues bien, la actividad de la nitrificación es esencialmente variable en las diferentes estaciones. Escasa ó nula en invierno, á causa de la baja de temperatura, aumenta en primavera y llega á su máximo en verano.

Consideremos el caso de una buena tierra de labor, desnuda, es decir, desprovista de vegetación: á fin de verano es cuando esta tierra contendrá más nitratos. Pero, como, en general, los conductos de las aguas de infiltración llevan poco líquido en verano, á causa de la activa evaporación que se efectúa en la superficie del suelo, la pérdida del nitrógeno nítrico será escasa. No será notable hasta una época posterior en que, habiendo bajado la temperatura, la evaporación será menor; el volumen de agua pluvial capaz de atravesar el suelo será entonces más considerable. Se deduce de esto que la determinación del nitrógeno nítrico de las aguas de infiltración debe proporcionar preciosas indicaciones respecto del trabajo microbiológico del suelo: pero, es preciso tener en cuenta el tiempo que tarda el líquido en atravesar la tierra considerada para poder referir con exactitud, en una época determinada, la intensidad de las reacciones que en ella se han efectuado en un momento dado.

Un problema análogo se presenta en el caso de un suelo cultivado. Aquí, la cuestión es más compleja. En efecto, la vegetación substrae

(1) En la cantidad de agua infiltrada influye también mucho la pendiente del terreno.—C. B.

al suelo importantes cantidades de nitrógeno nítrico: de donde deriva la pobreza relativa de las aguas de infiltración. Además, la planta evapora, durante el período de ascenso de su existencia, un volumen de agua considerable. El suelo que la sostiene, si no recibe suficiente cantidad de aguas meteóricas ó de aguas de riego, puede desecarse hasta tal punto que la proporción de humedad que contiene en una época dada sea demasiado escasa para subvenir las necesidades de la nitrificación. Por lo tanto, cuando este suelo, una vez despojado de las plantas que ha alimentado, será lavado por las lluvias, éstas no podrán llevarse más que cantidades muy pequeñas de nitrógeno nítrico: primero, porque la vegetación habrá utilizado en provecho suyo una mayor ó menor fracción de nitratos, y, en segundo lugar, porque la desecación de la tierra, por el mismo hecho de la evolución de la planta, habrá dificultado la actividad de la nitrificación.

Esta consideración es muy importante en materia de cultivo.

En las líneas que preceden sólo se ha tratado de suelos que se suponían dotados de una riqueza suficiente en principios minerales y á los cuales no se habían aplicado abonos. El estudio de las aguas de infiltración de tierras que han recibido nitratos, sales amónicas ó abonos orgánicos, como estiércol, ofrece un interés de primer orden. La composición de las aguas de infiltración, examinada en ciertas épocas del año, podrá informar respecto de la rapidez con que habrán filtrado los nitratos á través de la tierra; enseñará el tiempo empleado por las sales amónicas en convertirse en nitratos; permitirá comparar entre sí, desde el punto de vista de su aptitud para la nitrificación, los diversos abonos orgánicos: estiércol, sangre seca, residuos de prensar semillas, etc. Por consiguiente, indicará para un suelo de constitución física determinada, cuáles serán los abonos nitrogenados de más provechosa aplicación, es decir, los abonos que transformarán más pronto su nitrógeno orgánico en nitrógeno nítrico. Se comprende que la rapidez de esta transformación debe ser variable según la estructura de la tierra.

7. CONSECUENCIAS DEL ARRASTRE DE LOS NITRATOS.—Ya que los nitratos se van fácilmente de una tierra lavada por una cantidad suficiente de agua de lluvia, habrá gran interés en mantener el suelo cubierto todo el tiempo posible de vegetación, á fin de extraer, por intermedio y en provecho de la

planta, una fracción importante del nitrógeno nítrico que este suelo contiene. En otoño, en la época en que la tierra contiene, á pesar de la exportación vegetal, fuertes cantidades de nitratos, y en que son de temer lluvias abundantes, frecuentemente ocurre que el suelo, durante cierto tiempo, está sin vegetación y expuesto, por consiguiente, á perder sus nitratos de una manera más ó menos completa. Una práctica antigua que, según la naturaleza del suelo da resultados variables, pero á menudo bastante buenos, consiste en cultivar en una tierra que ha quedado desnuda una planta de vegetación rápida, capaz de desarrollarse entre la época en que se ha recogido la cosecha principal y la época en que se efectúa la siembra de una nueva planta. Este género de cultivo, destinado á absorber una fracción de nitrógeno nítrico que de otra manera se perdería, ha recibido el nombre de *cultivo intercalado.*

La planta fija el nitrógeno nítrico soluble y que se puede llevar el agua de lluvia; lo convierte en nitrógeno albuminoide insoluble y lo substrae así á una pérdida cierta. La suerte intercalada á los cultivos varía según los casos. Ordinariamente se entierran las plantas en el mismo sitio en que vegetan, á fin de otoño. Es evidente que el nitrógeno proteico quedará en este estado durante mucho tiempo; porque, durante el invierno, los fenómenos de descomposición microbiana, capaces de convertir el nitrógeno orgánico en nitrógeno amónico, son notablemente retardados á causa de la baja de la temperatura. Por el hecho de un cultivo intercalado *se insolubiliza* en cierto modo el nitrógeno nítrico. Al cabo de un tiempo variable, que depende de la naturaleza del suelo y de la elevación de la temperatura, el nitrógeno proteico recobrará sucesivamente la forma amónica y después la forma nítrica; será así, desde la siguiente primavera, puesto á disposición de los vegetales que se sembrarán en esta época en la tierra donde se había hecho antes el cultivo intercalado. Volveremos más adelante á este asunto.

Evaluación de las pérdidas por infiltración. — Cajas de vegetación.—El estudio racional de las aguas de vegetación es, pues, muy instructivo y, si hasta ahora hemos hablado sobre todo del nitrógeno nítrico, es porque este elemento es indispensable á la planta y su precio es bastante elevado. Además, la pérdida, á menudo considerable, del

ácido nítrico por infiltración es la que más repercute en la fertilidad de los suelos.

El análisis de las aguas de los conductos naturales de la infiltración (ríos y torrentes) proporciona datos sobre las pérdidas que sufre el suelo cuando es atravesado por las aguas de lluvia. Pero, el cálculo exacto del volumen del agua que ha atravesado el suelo, así como la evaluación real de las superficies regadas que han vertido sus aguas á un río, ofrecen alguna dificultad.

Los trabajos más cuidadosos y más útiles, en cuanto á la interpretación de los resultados obtenidos, son aquellos en alguna que se hace uso de las *cajas de vegetación*.

Así se llaman unas grandes cavidades abiertas en el suelo, cuyas paredes y cuyo fondo están aislados de la tierra del alrededor por medio de una capa bastante gruesa de mampostería, que se ha hecho impermeable revistiéndola de cemento. Estas cajas tienen de 3 á 4 metros cuadrados de superficie y 1 metro de profundidad. Se hacen en el fondo una ó dos aberturas destinadas á recoger el agua que atraviesa la masa de tierra. Se pone en estas cajas la tierra que se desea estudiar y se podrá imitar la constitución natural de un suelo disponiendo en el fondo de la caja un subsuelo artificial de la estructura que se quiera. Un pluviómetro, de superficie conocida, situado en la vecindad, indicará el agua de lluvia caída. Estos aparatos dan informes muy precisos, no sólo en el caso de las tierras desnudas, sino también en el caso de los suelos plantados y adicionados ó no de abonos. De estos informes nos valdremos á continuación.

De todos modos, á estos aparatos se les puede hacer evidentemente una objeción. La tierra que llena las cajas está necesariamente menos apisonada que en las condiciones naturales. Si la caja tiene, por ejemplo, la profundidad de un metro, esta tierra es mueIle en un grueso mucho mayor que en los suelos mejor trabajados. Á pesar de esto, las conclusiones que se pueden sacar de las observaciones hechas en las cajas de vegetación merecen ser atendidas. Se comprende que, á causa del mismo mullido del suelo, las cifras que representan la pérdida de ciertos elementos son más elevadas que las que se obtendrían en circunstancias más naturales. Esto es verdad especialmente al principio de las observaciones; después, la tierra se apelmaza poco á poco y adquiere una estructura normal. Por lo demás, no es éste un inconveniente serio: más vale conocer el máximum de las pérdidas que experimenta un suelo para poderlas remediar añadiéndole suficiente cantidad de materias fertilizantes.

A falta de cajas de vegetación, frecuentemente se han empleado

grandes recipientes de gres, provistos de agujeros, de unos cincuenta centímetros de altura y de un diámetro casi igual.

El estudio de las aguas de infiltración, desde el punto de vista químico, ha sido emprendido por muchos autores; recordaremos aquí principalmente los hechos dados á conocer por Lawes, Gilbert y Warington en Inglaterra, y por Dehérain en Francia.

Reanudemos ahora el estudio detenido de los diversos puntos que acabamos de indicar. Insistiremos principalmente en los siguientes hechos: cantidades de agua de lluvia que caen en una superficie determinada y relación existente entre el agua que atraviesa el suelo y el agua que este suelo ha recibido; experimentos de Lawes y Gilbert destinados a establecer esta relación; experimentos de Dehérain; substancias disueltas en las aguas de infiltración en los casos de tierras desnudas ó cultivadas con ó sin abonos; pérdidas de nitrógeno nítrico en las condiciones naturales; cultivos intercalados.

II

CANTIDADES DE AGUA DE LLUVIA QUE CAEN EN UNA SUPERFICIE DETERMINADA

Cantidad total.—Se tienen respecto de este punto datos bastante completos, relativos á un gran número de regiones del globo. Pero, no transcribiremos aquí más que algunas cifras destinadas á poner de manifiesto la variabilidad de altura de la capa de agua llovida en diferentes años.

En Montsouris (1), en la región del Sur de París, la altura media de la lluvia (en milímetros) durante veinte años (1875-1895) ha sido la siguiente, en los diversos meses del año:

diciembre	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio
46,1	36,1	31,5	35,9	39,8	43,2	58,1	54,5

agosto	septiembre	octubre	noviembre
50,6	45,4	58,7	48,1

(1) Según el *Annuaire de l'Observatoire municipal de Montsouris*, año 1897.

ó sea una altura media, para todo el año, de 548 milímetros. Durante este período, las variaciones han sido considerables, durante el mismo mes, de un año á otro. Citaremos algunos ejemplos. En la tabla que sigue, la primera cifra indica la altura máxima acompañada, entre paréntesis, del año, la cifra de debajo indica la altura mínima (en milímetros):

diciembre	enero	febrero	marzo	abril
84,6 (1872)	63,2 (1875)	59,1 (1873)	87,7 (1888)	84,9 (1878)
6,0 (1873)	9,1 (1876)	1,8 (1887)	6,0 (1893)	0,3 (1893)

mayo	junio	julio	agosto	septiembre
84,7 (1889)	137,9 (1873)	105,1 (1890)	79,2 (1886)	85,3 (1883)
3,6 (1880)	26,7 (1877)	16,6 (1885)	17,4 (1893)	0 (1895)

octubre	noviembre
149,8 (1892)	106,7 (1882)
19,7 (1888)	15,9 (1879)

En el curso del año, de diciembre á noviembre, la altura máxima del agua de lluvia ha sido observada en 1885-86; ha sido de 710,3mm. La altura mínima ha sido observada en 1873-74 y ha sido de 396,4mm, ó sea sólo 55 por 100. La superficie de una hectárea habrá recibido, pues, en 1885-86, 7103 metros cúbicos de agua; en 1873-74, 3964 metros cúbicos. Un año medio suministra 5480 metros cúbicos. En Inglaterra, la cantidad de agua caída es, en general, mayor que en París. En Rothamsted, especialmente, donde han sido hechas las observaciones de Lawes y Gilbert, se encuentran las siguientes medidas, en milímetros, relativas á un intervalo de veintisiete años (1853-1879):

enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto
65,5	42,9	43,4	50,8	60,7	62,7	66,3	68,6

septiembre	octubre	noviembre	diciembre	Total
64,0	75,7	58,9	51,6	713,3

El mínimo de agua caída se encuentra en febrero y el máximo en octubre, tanto en Rothamsted como en París (1).

(1) Según los datos del Observatorio meteorológico de la Universidad de Barcelona correspondientes á los años 1901-1910, los meses de septiembre y de octubre son los más lluviosos del año y en febrero llueve poco.—C. B.

Evaporación del agua.—Es evidente que la totalidad del agua de lluvia que cae en una superficie determinada no atraviesa el suelo. Una parte queda retenida en el interior de ésta, y esta fracción varía con el anterior estado de humedad de la tierra considerada y con su constitución física. Hemos estudiado ya esta cuestión al tratar de la impregnación de las tierras por el agua (pág. 148). Otra parte del agua caída se evapora en la atmósfera, y esta fracción varía principalmente con la temperatura y el estado higrométrico del aire. Cuando el suelo considerado está cubierto de vegetación, una porción del agua que había penetrado antes en la tierra se introduce en la planta para cuya actividad fisiológica es indispensable. Esta agua no se inmoviliza en ella, es continuamente lanzada á la atmósfera (transpiración), y es substituída sin cesar por una nueva cantidad de líquido que las raíces toman del suelo. A medida que la vegetación progresa, la planta se seca poco á poco, pero aun cuando parezca completamente seca contiene todavía una notable proporción de agua.

Nos falta investigar cuál es la fracción del agua de lluvia que, según las diversas circunstancias que acabamos de citar, atraviesa completamente el suelo y disuelve durante su paso ciertas substancias fertilizantes que quedan entonces perdidas para la vegetación.

Por de pronto puede formarse una idea sumaria de la cantidad de agua evaporada, del siguiente modo. Tomemos, como hace Dehérain, una considerable extensión de tierra, respecto de la cual se tengan las indicaciones precisas relativas á la cantidad de agua llovida y á la que los ríos llevan anualmente al mar. En Francia, en una superficie de unos 528000 kilómetros cuadrados llueven, por año, 417 mil millones de metros cúbicos de agua, correspondientes á una altura media de 700 milímetros de agua de lluvia. Los ríos se llevan 180 mil millones de metros cúbicos; la relación $\frac{180}{417}$ es igual á $\frac{43}{100}$. Se deduce de esto que la totalidad del suelo de Francia absorbe 43 por 100 del agua caída, que pasa á los ríos y que 57 por 100 de esta agua va á la atmósfera por evaporación.

Estos datos en bruto no nos informan *del estado* de las superficies; aquí no se trata más *que del conjunto de la evaporación*, que

procede á la vez de los espacios desprovistos de vegetación y de los que la llevan.

Risler, en su propiedad de Calèves (Suiza), ha estudiado durante diez años (1867-1876) *la relación* entre las cantidades de agua caída y de agua evaporada en tierras cultivadas en estado normal (trigo, alfalfa, trébol). El campo de cultivo tenía una superficie de 10 áreas; las aguas que atravesaban el suelo eran recibidas en una serie de conductos *(drains)* dispuestos de una manera regular. De suerte que este experimento, hecho en una escala algo grande, tiene un valor indiscutible.

La altura media de la lluvia en los diez años fué de 944,6 mm. Los conductos recogieron 250,8: la diferencia, es decir, 693, representa á la vez el agua que volvió á la atmósfera por simple evaporación, el agua retenida por el suelo y el agua que, en un momento dado, ha formado parte de los tejidos vegetales. Se encuentra, pues, que, en la localidad donde se ha hecho esta observación, de 100 partes de agua caída, 26 partes fueron recogidas por los conductos de escurrimiento y 74 partes se evaporaron. Se trata aquí de un suelo cultivado *normalmente*. Las cifras de este experimento enseñan, comparadas con las que hemos citado relativamente á la superficie de Francia, que la influencia de la vegetación en la cantidad de agua de lluvia evaporada es considerable: las plantas desecan parcialmente el suelo. Tendremos después ocasión de encontrar la confirmación de este hecho.

Experiencias de Lawes y Gilbert.—Estos autores, para recoger y medir el agua de infiltración, construyeron cajas de ladrillos que contenían gruesos de tierra de 0,50 m., 1 m. y 1,50 m. Sus experimentos han sido continuados durante mucho tiempo (1853-1880). Nos fijaremos aquí, sobre todo en el período decenal (1871-1880), durante el cual se han obtenido muchos datos.

Lawes y Gilbert han estudiado primero la relación entre la cantidad de agua caída en cada estación y la que atraviesa un espesor determinado de tierra. La media anual de la altura de la lluvia ha sido de 786 milímetros; los $\frac{44}{100}$ de esta agua han penetrado en el suelo. En el clima de París, menos húmedo que el de Inglaterra, el agua que atraviesa el suelo no es mucho más del tercio del agua llovida.

Lawes y Gilbert hacen observar que el paso del agua á través de la tierra se efectúa de dos maneras diferentes: 1.°, *por infiltración*

directa. En este caso el agua se infiltra siguiendo los canales que surcan toda la masa del suelo. Este paso es muy fácil, porque estos canales, que consisten en grietas y hendiduras, persisten aún cuando ha cesado la sequedad: 2.º, *por infiltración general*. El agua filtra entonces poco á poco á través de todo el espesor de la tierra. Se satura de las sales que encuentra en ella; mientras que, en el caso de la infiltración directa, no puede disolver más que una cantidad bastante pequeña. Cuando la tierra es ligera, naturalmente porosa, la imbibición es rápida y principalmente se efectúa una infiltración general. Pero, si se trata de una tierra fuerte, el agua se desliza primero en los canales preexistentes antes de mojar á la masa entera del suelo: la infiltración directa precede, pues, á la infiltración general.

Se han observado en Inglaterra, desde el punto de vista de la variabilidad anual de la caída de las aguas pluviales, fenómenos análogos á los que ya hemos citado antes á propósito de las observaciones hechas en Montsouris. El año 1874, por ejemplo, no ha dado más que 574 milímetros de agua; el año 1879 ha dado 1079 milímetros. Cayó, pues, mucha más agua en Rothamsted que en París.

La relación entre la cantidad de agua que pasa á los conductos de escurrimiento y la que cae en el suelo, varía enormemente con las estaciones, y esto por las causas que hemos indicado antes. El período abril-septiembre da 26 p. 100 de agua de infiltración; por lo tanto, 74 p. 100 del agua caída se ha evaporado. El período octubre-marzo da 62 p. 100 de agua de infiltración y 38 p. 100 de agua evaporada. Esto respecto de la media. Pero, de un año á otro las diferencias son, á veces, muy grandes: 100 p. de agua caída en verano han dado de 7,9 á 47,6 partes de agua de infiltración; durante el invierno, 100 partes de agua han dado de 39 á 80 partes de agua de infiltración.

La cantidad de agua que se evapora en la superficie de un suelo *no cultivado* depende de la temperatura del aire, de su estado higrométrico, de la intensidad del viento, de la temperatura del suelo, del modo de distribuirse el agua en el suelo. Este último punto tiene su importancia. En efecto, la observación enseña que una lluvia abundante y que cae rápidamente suministra un volumen de agua de infiltración mayor, por lo tanto hay menor evaporación, que la misma cantidad de agua repartida en la misma superficie durante un tiempo más largo. En verano, dada la elevación de la temperatura, la evaporación del agua es incomparablemente mayor que en invierno: sin embargo, la cantidad de agua que cae durante el verano sobrepuja en mucho á la que cae en invierno. A pesar de esto, y por causa de la gran evaporación del agua en el verano, la tierra deja filtrar más agua en invierno que en verano.

En Rothamsted, durante el período decenal considerado, la relación entre el agua evaporada y el agua que ha atravesado la tierra, ha oscilado entre las cifras siguientes:

En 100 partes de agua caída:

	enero	marzo	junio	septiembre	noviembre
Agua evaporada . .	24	60	80	65	30
Agua infiltrada . .	76	40	20	38	70

Conviene observar que se comete un error calculando por diferencia el agua evaporada. Porque, á partir del invierno hasta medio verano, el suelo experimenta una desecación progresiva y continua: por lo tanto, la evaporación real es superior á la diferencia entre la lluvia caída y el agua de infiltración recogida. El fenómeno inverso ocurre durante el período de enfriamiento, en el cual el suelo se satura poco á poco de humedad.

Cuando se trata de un suelo cultivado, las cosas son diferentes. Las hojas evaporan cantidades considerables de agua en relación con la luz que reciben. Y la asimilación clorofiliana depende de esta luz. De suerte que, entre el crecimiento de un vegetal y su transpiración, debe existir una estrecha relación. Lawes y Gilbert observan que, en circunstancias favorables, esta relación es sensiblemente constante. Según sus experimentos debe admitirse que, cuando la planta elabora un gramo de materia seca, evapora de 250 á 300 gramos de agua. En realidad, la diferencia entre las cifras es aún mayor, según resulta de trabajos posteriores.

Experimentos de Dehérain.—Empleando grandes macetas de grés llenas de tierras de diferente origen, Dehérain ha demostrado en Grignon (en los alrededores de París) que las aguas de infiltración no alcanzan nunca al tercio del agua de lluvia caída. La cantidad de agua que escurre de las tierras pobres en humus, siempre es algo mayor que la filtrada á través de una tierra más rica: sin embargo, las diferencias son bastante pequeñas.

He aquí un ejemplo, dado por este autor, de la infiltración en una tierra desnuda, observado en una capa de vegetación de 4 metros cuadrados de superficie y 1 metro de profundidad, del 27 de febrero de 1892 al 2 de marzo de 1893. Si se refieren las cifras á la superficie de 1 metro cuadrado, se encuentra que el agua pluvial ha dado 566 litros, y el agua de infiltración 145 litros; resulta que sólo 25.6 p. 100 del agua de lluvia ha atravesado la tierra. La infiltración ha sido nula del 17 de febrero al 21 de julio; del 12 de noviembre al 2 de marzo, representaba 46 p. 100 del agua caída. Se ve, por este solo ejemplo, qué enormes variaciones presenta la cantidad de agua que filtra, con relación á la que cae en el suelo, y la necesidad que hay de estudiar estos fenómenos en períodos muy largos.

Cuando se trata de suelos cultivados, ocurre á menudo que no se recogen aguas de infiltración antes del fin del otoño, porque las plantas han desecado hasta tal punto el suelo, que las primeras lluvias de otoño no bastan para mojar completamente la tierra.

III

RIQUEZA DE LAS AGUAS DE INFILTRACIÓN EN ELEMENTOS FERTILIZANTES

La composición mineral de las aguas de infiltración varía esencialmente con la composición química del suelo: varía también con la presencia ó ausencia de vegetales, porque éstos absorben elementos de fertilidad que son entonces substraídos á los líquidos que impregnan la tierra: depende asimismo del grado de vigor de las plantas y de su naturaleza: una planta absorbe más cantidad de una substancia que otra. Por último, está en relación con la cantidad y la naturaleza de los abonos empleados.

Se encuentran en las aguas de infiltración de las tierras cultivadas dos elementos de primera importancia: el nitrógeno nítrico y el calcio (en forma de bicarbonato, sulfato, cloruro). También se encuentran notables cantidades de sosa. Muchas aguas de infiltración contienen proporciones bastante elevadas de cloro y de ácido sulfúrico. Los demás elementos fertilizantes, ácido fosfórico, potasa, amoníaco, generalmente sólo existen en cantidades mínimas, á veces sólo en indicios. En efecto, la mayor parte de las tierras de labor, á menos que sean extremadamente pobres en calcáreo y en humus, tienen, respecto de estas tres últimas substancias que acabamos de citar, un poder absorbente muy marcado.

Caso de las tierras no cultivadas ó de las tierras que no han recibido abonos. — El ácido nítrico es el elemento cuya proporción más interesa conocer, á causa de la indiscutible utilidad de esta substancia y de su precio relativamente elevado. Además, el estudio de las pérdidas de nitró-

geno nítrico da una medida directa del trabajo químico y bacteriológico del suelo.

El máximo de riqueza en nitratos se presenta generalmente en la primera infiltración de otoño, según Lawes y Gilbert. Poco á poco, esta riqueza disminuye y se observa un mínimo de nitratos en la primavera. Esto es fácil de comprender porque los nitratos se acumulan en el suelo durante el verano, gracias á una temperatura favorable á la evolución del fermento nítrico. La infiltración en esta estación es escasa, y á veces nula: porque, entonces, aun cuando se trate de una tierra desnuda, la evaporación es considerable. Se debe observar, no obstante, que las primeras aguas que escurren en los conductos, en el mes de octubre, no son forzosamente las más cargadas de nitratos. En efecto, éstos á veces son sobre todo abundantes en las capas superiores del suelo; no aparecen en las aguas filtradas hasta que toda el agua de la capa subyacente á ellos ha sido desalojada.

Durante un período de nueve años, se han encontrado como término medio en las aguas de infiltración, por agua y por hectárea, las siguientes cantidades de nitrógeno nítrico (1877-1886): De marzo á junio=7 kg.,5; de julio á sepbre.=8,7; de oct. á feb.=27; ó sea un total de 43 kg. recogidos en una caja de vegetación de 1,50 m. de profundidad (Warington). El solo período trienal (1877-1880), había dado, por año y por hectárea: 49,4 kg. de nitrógeno nítrico; lo que equivale á un abono de unos 300 kg. de nitrato sódico (Lawes y Gilbert). A este nitrógeno perdido hay que añadir pequeñas cantidades de nitrógeno amoniacal y de nitrógeno orgánico, que en suma presentan unos 2 kg. El agua de lluvia lleva al suelo anualmente una media de 5 kg. de nitrógeno combinado, cifra más pequeña que la que se observa en Francia especialmente.

Si la tierra desnuda está sometida á muchas labores que renuevan las superficies y activan la nitrificación, la pérdida en nitrógeno nítrico puede ser mucho más elevada que la que acabamos de señalar. Dehérain ha encontrado, en Grignon, en las aguas de infiltración de las tierras desnudas de sus cajas de vegetación, tierras trabajadas y que no habían recibido abonos, cifras de nitrógeno nítrico infinitamente mayores que las que han dado Lawes y Gilbert.

Sea lo que fuere, las pérdidas de ácido nítrico son notables, sobre todo en la infiltración de otoño. Veremos más adelante de qué manera se las puede disminuir. Evidentemente, estas pérdidas deberán bajar mucho cuando el suelo está cubierto de vegetación y ésta

es vigorosa. Si el suelo es poco calcáreo, el ácido nítrico se encuentra combinado con la potasa: se halla en estado de nitrato cálcico cuando las tierras son calcáreas.

Por lo que toca al *ácico fosfórico,* materia de primera importancia en la economía vegetal, las pérdidas son generalmente mínimas. Son de un centenar de gramos por año y por hectárea en muchos casos. Pronto expondremos los resultados obtenidos en tierras enriquecidas con abonos.

La *potasa* es arrastrada por las aguas de infiltración en pequeña cantidad. De todos modos, la proporción de esta base es más elevada que la del ácido fosfórico. Dehérain ha demostrado que el peso de este álcali podía llegar á 2,8 gramos por metro cúbico de agua, en las tierras agotadas por el cultivo: lo que representaría, para la superficie de una hectárea, una pérdida total anual de unos 5 kilogramos, respecto de las tierras de Grignon. En el caso de una tierra que nunca hubiese recibido abonos, la pérdida sería aún menor. Por el contrario, es más elevada en tierras bien abonadas, pero raramente pasa de una decena de kilogramos por año y por hectárea.

Resulta de lo que precede que, de los tres principales elementos de fertilidad de un suelo, nitrógeno, ácido fosfórico y potasa, los dos últimos son casi integralmente conservados por la tierra y sólo los hacen desaparecer los cultivos. Para hacer el balance de estos dos elementos de fertilidad, se buscará la diferencia entre la exportación por las cosechas y las cantidades aplicadas con los estiércoles ó con los abonos químicos. Por lo que se refiere al nitrógeno, deben tenerse en cuenta, por el contrario, las pérdidas atribuíbles á las aguas de infiltración.

La *cal,* según hemos dicho muchas veces, es uno de los elementos más útiles al suelo. Aunque la solubilidad de su carbonato en el agua sea escasa, esta solubilidad aumenta por el hecho de la presencia en la tierra de una proporción de gas carbónico variable, pero á veces bastante elevada: así se puede esperar encontrar en las aguas de infiltración una cantidad de carbonato, ó mejor dicho de bicarbonato cálcico, tanto mayor cuanto más cargada esté la tierra de materia orgánica y cuanto mejor permita oxidarse á esta materia orgánica una buena circulación del aire. Sabemos que la intensidad de la vida microbiana rige la riqueza de un suelo en gas carbónico. A esta pérdida de cal en forma de bicarbonato deben añadirse las pérdidas en estado de sulfato cálcico; añadiéndose la pérdida de cal en esta forma á la del bicarbonato, resultarán en ciertos casos cifras muy elevadas, que pueden pasar de 400 ó 500 kilogramos de cal por año y por hectárea. Si el suelo es pobre en sul-

fato cálcico, pero recibe abonos sulfatados (sulfato amónico ó potásico), la doble descomposición que se efectúa entre estos sulfatos y el calcáreo producirá una eliminación de sulfato cálcico tanto mayor cuanto mayor sea la cantidad de abonos sulfatados aplicada. Lo mismo ocurre respecto de la presencia de la cal en estado de cloruro cálcico. Esta eliminación será tanto más considerable cuanto más elevada sea la proporción de cloruro potásico que este suelo haya recibido como abono.

Tomemos, como ejemplo de la importancia de la cal, los experimentos de Lawes y Gilbert en el campo de trigo de Rothamsted (el cultivo del trigo quita al suelo poca cal). Estos autores han encontrado, en una parcela sin abonos, la cantidad de 98,1 gramos de cal por metro cúbico de agua de infiltración. Si se supone, como hemos dicho antes (página 515), que caen por término medio en esta propiedad 786 milímetros de agua y que el 44 por 100 de esta agua se infiltra, esto representaría por hectárea una pérdida de 338 kilogramos de cal.

Se comprueban á veces pérdidas aun más considerables; Stoklasa ha encontrado en los suelos de Bohemia, en los cuales la respiración microbiana es muy variable, cifras que varían de 218 á 1268 kilogramos de carbonato cálcico eliminados por año y por hectárea. Estas enormes pérdidas de cal deben fijar la atención.

La cantidad de calcáreo que se encuentra en las aguas de infiltración no depende de la proporción absoluta de esta substancia en el suelo; sabemos que varía más que con la proporción, es decir, la tensión del gas carbónico que existe en la atmósfera interna de la tierra. También los abonos sulfatados ó clorurados solubles disuelven, por doble descomposición, más calcáreo en un suelo rico que en un suelo pobre en carbonato cálcico. Si, pues, á consecuencia de abundantes aplicaciones de abonos, orgánicos, sulfatados, clorurados, desaparece una cantidad tan grande de calcáreo y el suelo es naturalmente pobre en esta substancia, habrá que devolver, en un momento dado, á este suelo la cal que habrá perdido por efecto de las reacciones que acabamos de indicar. A *fortiori*, si se ha debido encalar ó margar una tierra poco calcárea, es necesario tener muy en cuenta los fenómenos que tienden á eliminar poco á poco el carbonato cálcico.

El *cloro* que se encuentra en las aguas de infiltración está combinado con el sodio y con el calcio. Se halla en proporciones muy variables. La parcela del campo de trigo de Rothamsted, de que hablábamos antes, cultivada sin abonos, contenía, por metro cúbico de agua de infiltración, 10,7 gramos de cloro. Por medio del cálculo antes hecho, se ve que, por año y por hectárea, se eliminan con las aguas unos 37 kilogramos de cloro. A partir de una media deducida de un gran número de experimentos, el agua de lluvia, lleva al suelo unos 15 kilogramos de cloro por hectárea.

El *ácido sulfúrico*, combinado también con el sodio y el calcio, se ha encontrado en cantidad de 24,77 gramos por metro cúbico; ó sea una pérdida de 85 kilogramos por año y por hectárea. Esta eliminación continua del ácido sulfúrico, dicho sea de paso, debe tomarse en serio; porque, en los suelos naturalmente pobres en sulfatos, puede llegar un momento en que la proporción de ácido sulfúrico sea bastante escasa para dificultar la buena marcha de la vegetación. El azufre, en efecto, forma parte integrante de la molécula albuminoide.

La *sosa* se elimina con las aguas de infiltración en forma de sulfato y de cloruro; más raramente eu forma de nitrato, á menos que el suelo haya recibido cantidades excesivas de este abono. El empleo habitual, en muchas tierras, de este último agente de fertilidad hace subir mucho la proporción de sosa que se encuentra en las aguas de inflltración.

La pérdida de sosa es, pues, siempre notable: sabemos, en efecto, que esta base es mal retenida por el poder absorbente del suelo. En el ejemplo de la parcela del campo de trigo de Rothamsted sin abonos, esta pérdida, calculada por hectárea, asciende á unos 20 kilogramos. Pero, como diremos más adelante, el peso de la sosa eliminada puede ser diez veces mayor en ciertos casos.

Caso de las tierras cultivadas que han recibido abonos.—Muy diferentes son las cifras que representan las pérdidas por las aguas de infiltración en el caso de tierras cultivadas con ó sin abonos. Una tierra cultivada siempre es menos húmeda que una tierra en barbecho, y por consiguiente las pérdidas por infiltración disminuyen. Si, á modo de ensayo, como se ha hecho en las cajas de vegetación, se aplican á una tierra desnuda diversos abonos, á fin de determinar la naturaleza y la cantidad de las substancias que aparecen en las aguas de infiltración por la acción de estos abonos solos, se pueden hacer algunas interesantes observaciones. Especialmente estas observaciones se refieren á la velocidad con que nitrifican las materias nitrogenadas orgánicas (estiércol, abonos verdes, residuos de prensar semillas, sangre seca, etc.), así como las sales amónicas. Se observa, en estos ensayos, que las sales amónicas generalmente nitrifican muy bien, con la condición de que la proporción de humedad sea suficiente. Esta proporción óptima varía con la estructura física del suelo, como sabemos. La nitrificación del nitrógeno

amónico es también función de la temperatura: en otoño, por consiguiente, es poco notable; puede quedar suspendida durante los meses de invierno y se reanuda en primavera. Pero, el nitrógeno amónico sigue fijado al suelo, y las aguas de infiltración á menudo no contienen más que indicios.

Si el suelo es suficientemente calcáreo, todos los abonos orgánicos nitrogenados pueden nitrificar en él. La velocidad de la nitrificación de estas materias depende por de pronto de su grado de división, así como de la rapidez con que las numerosas amidas complejas que entran en sus moléculas nitrogenadas se transforman en amoníaco. La sangre seca y los abonos verdes son las substancias que experimentan con más facilidad la fermentación amoniacal y por consecuencia nitrifican con mayor velocidad. Los abonos torrefactos (cuero, cuerno) nitrifican mucho más pronto que estos abonos tomados en estado natural, aun cuando estuviesen finamente divididos: sabido es que la acción del calor tiene por efecto convertir poco á poco la molécula albuminoide en moléculas más sencillas. En cuanto al estiércol, la amonización de su nitrógeno es más lenta. En efecto, si contiene materias cuya transformación en amoníaco ya está hecha á causa de las fermentaciones que ha experimentado al amontonarlo, la mayor parte de su nitrógeno se encuentra todavía en forma albuminoide (residuo de las camas). Cuando estas camas son abundantes y contienen restos de vegetales leñosos (brezos, helechos), la descomposición completa del estiércol en el suelo y la subsiguiente nitrificación del nitrógeno de estas materias exigirán á veces muy largo tiempo. Pero, esta lentitud de transformación presenta á menudo reales ventajas, tanto en concepto químico como desde el punto de vista físico.

Tales son las consecuencias más notables que se pueden sacar del estudio de las aguas de infiltración que escurren de las tierras no cultivadas, pero enriquecidas de substancias fertilizantes nitrogenadas de diversa constitución. Resulta de ello que, desde el punto de vista práctico, cuando una tierra requiere nitrógeno, es indispensable tener en cuenta su permeabilidad, su constitución química, la naturaleza de las plantas que en ella se quieren cultivar, antes de decidirse en la elección de la *forma* del nitrógeno que conviene dar á esta tierra.

Cuando el suelo está enriquecido de abonos y cubierto de vegetación, el estudio de las aguas de infiltración todavía es más interesante. Nos enseña este estudio, la cantidad y la naturaleza de las pérdidas que sufre la tierra y, por consiguiente, nos permite cono-

cer, á lo menos de un modo aproximado, cuál es la fracción de la materia fertilizante que, por una parte, permanece en el suelo, y la que, por otra parte, penetra en la planta. Esta última fracción se obtiene mediante el análisis de la cosecha.

Indiquemos muy sumariamente, respecto de este punto, algunos de los resultados obtenidos por Lawes y Gilbert en el campo de trigo de Rothamsted. Estos experimentos fueron hechos después de los que hemos explicado antes relativos á parcelas sin abonos.

En la adjunta tabla, la primera cifra indica, *en gramos*, la cantidad de substancia contenida en 1 metro cúbico de agua de infiltración, la segunda cifra la pérdida *en kilogramos* por hectárea, suponiendo una lluvia anual de 786 milímetros cuyos 44/100 hubiesen atravesado el suelo, es decir, 3450 metros cúbicos.

No hemos hecho figurar aquí las pérdidas en nitrógeno amónico; son insignificantes y no llogan más que á algunos centenares de gramos, aun en el caso de una abundante aplicación de sales amónicas.

Para una hectárea	Cal		Magnesia		Potasa		Sosa		Ácido nítrico		Cloro		Ácido sulfúrico		Ácido fosfórico	
	gr.	kil.	gr.	kil.	gr.	kil.	gr.	kil.	gr.	kil	gr.	kil.	gr.	kil.	gr.	kil.
350000 kilogramos de estiércol	147,4	508,5	4.9	16,9	5,4	18,6	13,7	47,2	16,1	55,5	20,7	71,4	106.1	336,6	»	»
224 kil. de sales amónicas + abonos minerales . .	143,9	496,4	7,9	27,2	4,4	15,1	10,7	36,9	8,5	29,3	20,7	71,4	73.3	252,8	1,54	5,3
448 kil. de sales amónicas solamente . . .	154,1	531,6	7,4	25,5	1,9	6,5	7,1	24,5	13,9	47,9	32,0	110,0	44.4	153,1	1,44	4,9
448 kil. de sales amónicas y superfosfatos	165,6	571,3	7,3	25,1	1,0	3,4	6,6	22,7	15,3	52,7	31,6	109,0	54,3	187,3	1,66	5.7

Las cifras anteriores, aun cuando no son evidentemente aplicables á todos los países, ni sobre todo á todos los cultivos, dan sin embargo una idea de las pérdidas sufridas por los suelos por la acción de la infiltración del agua de lluvia. Sería preciso corregirlas según las variaciones que presentan los suelos entre sí, desde el punto de vista físico y químico, según la cantidad de agua que cae en la localidad y la fracción de esta agua que atraviesa la capa del suelo, según la naturaleza de la planta cultivada y su grado de vigor. No se pueden establecer en este asunto más que reglas generales: no ha sido otro el objeto de este corto estudio.

IV

PÉRDIDAS DE NITRÓGENO NÍTRICO EN LAS CONDICIONES NATURALES

En las páginas anteriores se ha tratado de las pérdidas de nitrógeno nítrico en condiciones á menudo algo artificiales. Porque, cuando se emplean cajas de vegetación, la tierra está disgregada, es muy filtrante, y la nitrificación resulta exagerada, á lo menos en los primeros tiempos.

Schlœsing (1895) ha ensayado de evaluar la pérdida media, por hectárea, del nitrógeno que se llevan las aguas de infiltración al atravesar una gran extensión de territorio. Los ríos son los conductos naturales á donde van á parar estas aguas de infiltración. Los ríos reciben finalmente el nitrógeno quitado á la tierra vegetal. Es, pues, en las aguas de los ríos donde debe buscarse este nitrógeno. Pero, si los nitratos atraviesan una tierra de labor sin sufrir pérdidas, pueden sufrir un desgaste por el hecho de la presencia de vegetales acuáticos que los absorban.

Para eliminar esta causa de error y determinar con exactitud la cantidad verdadera de nitratos quitados por las aguas que atraviesan el suelo, Schlœsing hace notar que es necesario operar en un caso particular, esto es, el caso de estar suspendida la vegetación acuática. Esto es lo que ocurrió durante el período de frío riguroso del mes de febrero de 1895. En aquel momento, los ríos no recibían aguas de escurrimiento superficial; sólo eran alimentados por aguas de infiltración. Se tomó agua de diferentes puntos del Sena, del Marne, del Yonne, del Oise, en la cuenca de París, y los caudales de agua de estos ríos fueron calculados según las fórmulas conocidas. Es notable que las aguas subterráneas conservaron un valor casi constante en ácido nítrico. La media de todas estas determinaciones fué de 9,33 miligramos de ácido nítrico por litro, esto es, 2,42 mili-

gramos de nitrógeno. Adoptemos esta última cifra como representante del valor medio de las aguas de infiltración que atraviesan el suelo durante un año.

Si se admite que la altura media del agua de lluvia es de 700 milímetros en la cuenca del Sena, y si la capa de agua que se infiltra es la sexta parte de esta cantidad, la superficie de una hectárea será atravesada por 1167 metros cúbicos de agua con una pérdida de 2,8 kilogramos de nitrógeno. Suponiendo que la capa de agua que se infiltra sea la cuarta parte del agua caída, la superficie de una hectárea será atravesada por 1775 metros cúbicos de agua con una pérdida de 4,29 kilogramos de nitrógeno. Para una infiltración del tercio, el volumen de agua que atraviesa la tierra sería de 2333 metros cúbicos, con 5,65 kilogramos de nitrógeno. Se ve que la pérdida en nitratos, así calculada, es bien inferior á la que dan las cajas de vegetación. De todos modos, estas cifras no representan más que un mínimo; porque, si se determina el ácido nítrico en las aguas de fuente, se encuentran números muchísimo más elevados.

En la época de las crecidas de los ríos, el fenómeno es muy diferente. En el mes de noviembre de 1896, Schlœsing tomó muestras de agua: del Sena, en París; del Marne, en Charenton; del Alto Sena, en Montereau; del Yonne, en Montereau también. El nitrógeno nítrico estaba representado por las siguientes cifras: 5,08 miligramos; 3,13; 4,46; 4,50, respectivamente. Si se tiene en cuenta, en el mismo momento, el caudal de estos ríos, se encuentra que, en el tiempo de veinticuatro horas, estos ríos habrán llevado:

	Ácido nítrico $\frac{N^2O^5}{2}$	Ácido nítrico calculado en NO^3K
Yonne	351000 kilogramos	650000 kilogramos.
Alto Sena	54000 —	101000 —
Marne	107000 —	200000 —
Sena, en París . . .	486000 —	909000 —

Todos estos nitratos no proceden evidentemente más que de la nitrificación natural de las diversas cuencas: es, pues, necesario creer que la actividad nitrificante es infinitamente mayor de lo que indican las primeras determinaciones, pero sólo alcanza las cifras precedentes cuando las lluvias son bastante abundantes para lavar completamente el suelo.

Ocupémonos ahora en los *cultivos intercalados* cuyo objeto es limitar, en cierta medida, la pérdida de nitratos.

V

CULTIVOS INTERCALADOS

Un suelo en barbecho pierde, con las aguas de infiltración, considerables cantidades de nitrógeno nítrico. Cuando la tie-

rra está cubierta de vegetación, sabemos que estas pérdidas son mucho menores, primero porque la planta evapora muy grandes cantidades de agua que quita, por consiguiente, al suelo, y además utiliza una importante fracción de los nitratos. Las aguas de infiltración son, pues, menos abundantes y están mucho menos cargadas de nitratos. Dada la variedad de cultivo que se da en un suelo, puede ocurrir que, después de la madurez de una cosecha y de su recolección, la tierra quede desnuda durante un tiempo más ó menos largo. Si esta época coincide con el otoño, y si llueve en abundancia durante esta estación, los nitratos, acumulados en el suelo por efecto de la temperatura favorable del verano, corren peligro de pasar á las aguas de infiltración. Estas son las pérdidas que se trata de evitar ó de atenuar en lo posible.

Parece, *a priori,* que se puede lograr esto poniendo en el suelo, momentáneamente desprovisto de cultivo, una planta de vegetación rápida, capaz de evaporar mucha agua y de apoderarse de los nitratos que las lluvias están á punto de llevarse. He aquí algunas indicaciones sumarias tomadas de los experimentos que Dehérain ha hecho sobre este punto, experimentos susceptibles de dar una idea muy clara de la utilidad de la práctica en que nos ocupamos ahora. Encontraremos en lo que sigue una aplicación interesante del estudio de las aguas de infiltración.

Se aplican principalmente al suelo cultivos intercalados de *mostaza blanca* ó de *arvejas*. La mostaza vegeta rápidamente, su follaje es bastante espeso; la arveja, en su calidad de leguminosa, puede, además, fijar el nitrógeno gaseoso del aire. La cantidad de materia vegetal que proporciona un cultivo intercalado varía, como se comprende, enormemente de un año á otro según las condiciones climatológicas del otoño. Pero, siempre substrae al suelo una fracción de nitrógeno nítrico más ó menos importante que, sin ésta, se perdería en las aguas de infiltración.

Al principio de la mala estación se trata de saber lo que conviene hacer de este cultivo: 1.°, se podrá, si el año considerado ha sido pobre en forrajes, dar la cosecha al ganado

como alimento, y el suelo sólo conservará como abono las raíces de la planta; 2.º, si la tierra en que se ha hecho el cultivo intercalado está bien abonada y una tierra próxima lo está menos, se podrá enterrar en esta última la parte aérea del cultivo intercalado que correspondía á la tierra buena; 3.º, por último, y es el caso más general, la planta intercalada se enterrará en el mismo suelo en que ha crecido. Pero, este enterramiento, ¿deberá efectuarse en otoño ó bien se deberá esperar á la primavera próxima?; ¿qué efecto se obtendrá según sea la época en que se entierre la planta?

Aprovechamiento de los cultivos intercalados.—Análogos experimentos fueron hechos por Dehérain en las capas de vegetación de que se ha tratado antes. El análisis de las aguas de infiltración, desde el punto de vista de su riqueza en nitrógeno nítrico, dará la solución del problema.

Se comparará la riqueza en ácido nítrico de las aguas procedentes de cajas con cultivos intercalados, dispuestas, como hemos dicho, con la de las de tierras desnudas; de esta comparación resultará la utilidad de estos cultivos. La determinación comparativa de los nitratos deberá principiar desde el otoño, á fin de juzgar la eficacia de los cultivos intercalados para disminuir ó anular la pérdida de los nitratos; esta determinación deberá continuarse durante el invierno. Los cultivos intercalados, en efecto, podrían simplemente retardar la pérdida de nitrógeno nítrico, puesto que un suelo cubierto de vegetación á menudo es desecado hasta tal punto que los conductos de las aguas de infiltración quedan secos á causa de la transpiración de la planta. Pero, si los nitratos han sido simplemente *retenidos,* serán arrastrados por las lluvias de invierno, y las aguas infiltradas serán más concentradas en nitrógeno nítrico que si se filtrasen á través de tierras desnudas, ya lixiviadas por las lluvias de otoño.

En fin, en el momento en que las plantas del cultivo intercalado son enterradas, el nitrógeno que contienen se encuentra en ellas principalmente en estado de *nitrógeno albuminoide*, procedente de una transformación del nitrógeno nítrico que han absorbido en el curso de su evolución. Este nitrógeno albuminoide sufrirá en contacto con la tierra una serie de metamorfosis que hemos estudiado anteriormente, y cuyo resultado final será la transformación inversa de este nitrógeno insoluble en nitrógeno soluble, es decir, en nitrógeno nítrico. Resulta de aquí que es necesario conocer en qué época este nitrógeno de los cultivos intercalados recobrará la forma soluble y

se encontrará á disposición de los vegetales que se pongan en los suelos enriquecidos por estos cultivos intercalados. Se sabrá la solución de este problema determinando la riqueza de las aguas en nitratos durante el resto del año.

El entierro de las plantas intercaladas puede efectuarse en diversas épocas, como hemos dicho antes, y la determinación de los nitratos en las aguas de infiltración nos indicará cuánto tiempo deben permanecer en el suelo las plantas enterradas para que su nitrógeno albuminoide recobre la forma soluble de ácido nítrico: así se conocerá cuál es la época más favorable para enterrarlas.

He aquí la exposición de las investigaciones de Dehérain durante los años 1891-1892:

1.° Los cultivos de mostaza y de arveja están especialmente indicados por el rápido crecimiento de estas plantas y por su rusticidad. Sembrada en otoño de 1890, que no fué año de lluvias, la mostaza no adquirió gran desarrollo, pero era rica en nitrógeno (26 por 100 de materia seca contenían 6 por 100 de nitrógeno). Si se hubiese enterrado esta mostaza, habría dado por hectárea 1 200 kilogramos de materia seca, con 72 kilogramos de nitrógeno. Las arvejas, en 1891, poco desarrolladas, pero ricas en nitrógeno, habrían dado por hectárea 167 kilogramos de nitrógeno; en 1892, esta misma planta adquirió mucho mayor desarrollo, pero su riqueza en nitrógeno fué menor; no habría dado más que 88 kilogramos.

Estos cultivos podrían mantenerse en pie durante todo el invierno. Su vegetación es entonces poco activa, su transpiración escasa, y la tierra deja escurrir agua por infiltración. Á pesar de esto, las pérdidas de nitrógeno nítrico son menores en los suelos plantados que en la tierra desnuda. Así, durante el período noviembre 1891-febrero 1892, se ha encontrado en las aguas de infiltración (en la superficie de una hectárea): en el caso de las tierras desnudas, 15,6 kilogramos; en el caso de la tierra en que se cultivaban arvejas, 12,04 kilogramos, y en el caso de la tierra en que se cultivaba la mostaza, 6,76 kilogramos de ácido nítrico.

Cuando la planta ha sido cortada en el mes de diciembre para servir de alimento al ganado, el suelo ha quedado expuesto á las lluvias de invierno después de la corta; no contiene entonces más que las raíces de la planta y poca parte verde. El suelo que contiene estas raíces no ha perdido, durante el intervalo de tiempo antes indicado, más que 12,6 kilogramos de ácido nítrico, en vez de 15,6 kilogramos que pierde la tierra desnuda.

2.° Veamos ahora qué es lo que ocurre cuando se entierran las arvejas (la parte aérea cortada) en un suelo distinto de aquel en que se han desarrollado. Si se han enterrado á últimos de noviembre, la descomposición de las plantas verdes ya principia durante el invierno y, desde el mes de febrero, las aguas que han filtrado á través de la tierra así enriquecida contienen una proporción de nitrógeno nítrico

mayor que las aguas procedentes de tierras desnudas: ó sea, 17,9 kilogramos, en vez de 15,6.

Los nitratos que se han formado durante el verano y el otoño no han quedado, pues, en este estado en el suelo; han sido asimilados por las plantas sembradas en la segunda temporada.

El estudio de la riqueza de las aguas de infiltración en ácido nítrico, continuado durante la primavera y el verano del año siguiente, hace resaltar mejor la utilidad de los cultivos intercalados. Así, la tierra en que se habían cultivado las arvejas, y en la cual sólo quedaron las raíces de las plantas, cede á las aguas de infiltración mayor cantidad de nitrógeno nítrico que la que había quedado sin cultivo. Se ha encontrado:

Acido nítrico en las aguas de infiltración de 1 hectárea durante la primavera, el verano y el otoño de 1892.	Tierra desnuda .	72 kilogramos.
	Tierra que no ha conservado más que las raíces de las arvejas . .	93 kilogramos.

El nitrógeno orgánico de las raíces, por lo tanto, se había convertido, en buena proporción, en ácido nítrico.

La tierra que había recibido en noviembre la parte aérea de las arvejas cedió á las aguas de infiltración, durante el mismo período de tiempo, 102 kilogramos de nitrógeno nítrico.

Se deduce de esto que, en el caso en que se hubiese hecho un cultivo en el suelo que había conservado las raíces de las arvejas, y en el que había recibido la parte aérea de estas plantas, los vegetales habrían aprovechado un *plus* de nitratos de 93—72 = 21 kilogramos en el primer suelo, y de 102—72 = 30 kilogramos en el segundo.

3.° La tierra en que se ha enterrado, en febrero de 1892, la totalidad de su cultivo intercalado, cedió á las aguas de infiltración, durante la primavera, el verano y el otoño de 1892, una cantidad de nitrógeno nítrico de 109,9 kilogramos; ó sea, una diferencia de 109,9—72 = 37,9 kilogramos con relación á la tierra desnuda. En el caso de una tierra con un cultivo intercalado de trébol y mostaza, enterrado en 27 de marzo de 1892, el nitrógeno nítrico que filtró durante la primavera, el verano y el otoño de 1892, subió á 125 kilogramos, ó sea, un excedente de 125—72 = 53 kilogramos de nitrógeno nítrico.

Aquí conviene hacer una observación importante. Es muy ventajoso enterrar un cultivo intercalado *antes del invierno*, y no esperar para ello el principio de la primavera. En efecto, durante el invierno, la materia orgánica de las plantas de este cultivo intercalado se descompone en el suelo, lentamente sin duda, pero su nitrógeno será apto para nitrificar en gran parte en cuanto se hagan sentir los primeros calores: se encontrará, pues, á disposición de las plantas sem-

bradas en primavera, es decir, en una época en que éstas lo necesitan mucho. Si, por el contrario, las plantas del cultivo intercalado no se enterrasen hasta el principio de la primavera, como el trabajo preliminar de descomposición, de simplificación y de amonización del nitrógeno orgánico exige cierto tiempo, la nitrificación de este nitrógeno no principiaría más que de un modo tardío, y los nitratos producidos sólo serían una muy mediana ayuda para las plantas que habrían sido sembradas en primavera en la parcela considerada. Esta observación concuerda de una manera absoluta con lo que ocurre en la práctica.

Así, gracias al empleo de los cultivos intercalados, el nitrógeno nítrico que contiene un suelo en otoño puede ser retenido en buena parte y escapar, por consiguiente, á una pérdida cierta si se cultiva en este suelo una planta de vegetación rápida cuyos órganos aéreos se entierran después mediante una labor. La planta se apodera del nitrógeno nítrico y lo inmoviliza en cierto modo en forma de nitrógeno albuminoide. Este, que está entonces en contacto con los diversos microorganismos del suelo, recobra poco á poco su forma soluble y difusible de nitrógeno nítrico con gran provecho de los vegetales que se hayan cultivado en esta parcela.

Las cifras anteriores pueden parecer muy elevadas. En efecto, lo son, como ocurre en los ensayos hechos en pequeña escala, dado que las labores á que se somete la tierra en una caja de vegetación son incomparablemente más cuidadosas que las que se dan á una vasta extensión de terreno. La tierra de una caja está, además, muy disgregada. Pero, sea lo que fuese, y teniéndolo todo en cuenta, el sentido del fenómeno es el mismo en todos los casos.

Se pueden *resumir* del siguiente modo los datos que anteceden: Exceptuando los años de otoño muy seco que dan medianos resultados desde el punto de vista de la cosecha de las semillas, los cultivos intercalados generalmente tienen un éxito satisfactorio. Este éxito está mejor asegurado en las regiones del Norte que en las del Mediodía. El cultivo intercalado deseca parcialmente el suelo: por lo tanto, dificulta, por una parte, la eliminación de los nitratos por infiltración, porque absorbe estos nitratos; por otra parte, retarda la nitrificación porque priva á veces al suelo de la cantidad de humedad necesaria para esta función biológica. Por consiguiente, los cultivos intercalados no agotan el suelo al cual quitan nitrógeno, puesto que este nitrógeno reaparece posteriormente en forma nítrica cuando los vegetales han sido

enterrados y han quedado algún tiempo en el interior del suelo.

Aquí se impone una conclusión. Dada la considerable evaporación que una vegetación vigorosa ocasiona, el sistema de cultivo mediante el cual la tierra está más tiempo cubierta de vegetación, será el mejor para aminorar las pérdidas en nitratos. Por el contrario, las tierras en barbecho se empobrecerán mucho en nitrógeno nítrico.

Pero, es bien evidente que, cuando se trata de disponer un conjunto de cultivos y de elegir respecto de ellos en un sitio determinado, se deben tener muy en cuenta las influencias meteorológicas. «Por variada que sea la cantidad total de agua de lluvia caída y su distribución anual en un mismo país, la agricultura local ha debido aprender á someterse á las condiciones meteorológicas locales de la región, y cultivar de preferencia cereales donde la primavera es lluviosa y el verano seco, y forrajes donde las lluvias de verano no son escasas.» (Duclaux.)

CAPÍTULO XIII

ESTUDIO DE LOS SUELOS FORMADOS DONDE SE HALLAN (1) CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Factores generales de la vegetación.—Caracteres de los suelos desde el punto de vista agrícola.—Primeros ensayos de clasificación: tierras fuertes, tierras ligeras.—Clasificación de las tierras según sus propiedades físicas.—Clasificación de Gasparin.—Clasificación química.—Clasificación geológica.—Importancia de la geología aplicada á la agricultura.—Conclusiones.

Factores generales de la vegetación.—Desde el punto de vista agrícola, las bases científicas de una clasificación racional de los diferentes suelos que se encuentran en la superficie del globo están todavía por descubrir. No se puede, como vamos á ver, dar respecto de este punto más que indicaciones aproximadas.

Parecería natural admitir en la misma clase todas las tierras que tienen la misma constitución física ó química; sin embargo, son necesarias algunas restricciones respecto de este punto.

Observemos, en efecto, con Hall, que se encuentran en vastas extensiones suelos del mismo tipo, es decir, cuya constitución física ó química presenta alguna semejanza y cuya agrupación se impone, ya sea porque tienen la misma flora espontánea, ya porque son aptos para nutrir á una determi-

(1) Estos suelos *(sols en place)* se llaman también suelos *autóctonos* —C. B.

nada planta de cultivo. Estos suelos tienen el mismo origen geológico. De todos modos, su exacta delimitación es difícil á causa del tránsito insensible de un suelo á otro. Además, si un suelo de cierta constitución física ó química está cubierto generalmente de una misma vegetación espontánea, algunas de las plantas que componen esta vegetación pueden encontrarse en otro suelo, de estructura muy diferente. Una planta determinada no se desarrolla exclusivamente en una tierra determinada: las observaciones de este género son frecuentes. El castaño, por ejemplo, así como muchas coníferas, pueden crecer en suelos calcáreos al mismo tiempo que en suelos silíceos. Resulta de esto que la *calidad* del suelo no es el único factor que interviene en la evolución de la planta.

No se insistirá demasiado en el punto siguiente. Lo que constituye la calidad de un suelo, lo que distingue lo que se ha convenido en llamar un buen suelo de un suelo malo, es evidentemente la mayor proporción de elementos de fertilidad que se encuentra en el primero, suponiendo, como se comprende, que éste tenga una constitución física tal que la planta sea capaz de utilizar estos elementos. Pero, como ya hemos hecho notar anteriormente, si la capa del suelo es de poco espesor y está superpuesta á un subsuelo poco muelle y mal provisto ó desprovisto de substancias activas, los vegetales que en ella se desarrollan, sobre todo si están demasiado próximos unos á otros, no tendrán á su disposición más que un volumen de tierra insuficiente y no dispondrán, por consiguiente, más que de una pequeña cantidad de materias alimenticias. La riqueza *absoluta* de un suelo en materias nutritivas sólo tiene, pues, un valor relativo. No ocurre lo mismo si un suelo, aun cuando tenga una riqueza poco satisfactoria, descansa sobre un subsuelo muelle en el cual se encuentran hasta grandes profundidades elementos de fertilidad idénticos á los que contiene la capa superior, aunque estos elementos fuesen menos abundantes que en esta última capa. En este caso, la planta emite raíces largas y va á tomar en las capas profundas las substancias que no le proporciona la capa superficial. Un suelo pobre no es, pues, siempre un mal suelo cuando sólo se estudia su superficie.

Pero, cualquiera que sea la constitución de un suelo, existe un conjunto de fenómenos *exteriores* que no guardan ninguna relación con esta constitución y cuya importancia es, sin embargo, capital para el desarrollo de los vegetales. Todos los agrónomos están de acuerdo en el punto siguiente: *Una clasificación de los suelos debe tener muy en cuenta la cuestión del clima*. En efecto, la constitución física y la naturaleza química de un suelo no son los únicos factores que intervienen cuando se trata del cultivo: la cantidad de agua que cae en la región, la repartición de esta agua y la media de la temperatura en las diferentes estaciones, la altitud del suelo, su inclinación respecto del horizonte, son otros tantos factores que es necesario introducir en la apreciación del valor de una tierra por lo que al cultivo se refiere. Volveremos pronto á estas diferentes particularidades.

I

CARÁCTER DE LOS SUELOS DESDE EL PUNTO DE VISTA AGRÍCOLA

De Gasparin ha fijado bien estos caracteres; tomaremos de él algunos resúmenes que ha dado sobre este tema.

El agricultor no se preocupa de saber cuál es la constitución íntima de una tierra; sólo se pregunta qué género de plantas podrá nutrir esta tierra con más provecho para él, y qué abonos ó enmiendas deberá emplear para conseguir este resultado.

Una tierra puede ser examinada bajo muchos conceptos. Primero *desde el punto de vista químico*: ciertos elementos comunican á las tierras propiedades bien definidas que interesan al agricultor. La presencia del calcáreo permite el cultivo del trigo: si la tierra contiene yeso, ó si se le añade, será provechoso el cultivo de las leguminosas.

Las propiedades físicas de las tierras también intervienen en esta cuestión. Una tierra habitualmente fresca es apropiada para

prados; una tierra, seca en verano, conviene al trigo ó al centeno. Las tierras húmedas en invierno reclaman cosechas de primavera cuando han perdido en esta época una parte de su humedad.

Las propiedades mecánicas que hay que considerar son las que se refieren á la mayor ó menor facilidad con que la tierra puede ser trabajada. Si es silícea, arenosa, ó rica en humus, el trabajo mecánico es fácil; si es arcillosa, el trabajo será tanto más penoso cuanto más elevada sea la proporción de la arcilla.

Por último, respecto de los abonos y enmiendas que conviene aplicar á una tierra, se puede adelantar que, en los suelos arenosos y calcáreos, la descomposición de los abonos es fácil y que estos suelos reclaman abonos abundantes. Si la tierra es arcillosa, retiene bien los abonos que se le aplican, pero los descompone con lentitud. Deben aplicársele abonos en abundancia, pero con largos intervalos. Una tierra rica en humus exigirá el encalado.

El agua y su distribución.—Cualesquiera que sean los caracteres de un suelo, existe un elemento que nunca debe faltar en él. Este elemento es el agua. Se encuentran su acción indispensable y su influencia bienhechora como base de toda vegetación. Ya se trate de la germinación, del desarrollo de la planta, de la maduración de sus frutos, etc., el agua es, en cada etapa de la evolución vegetal, el elemento primordial que interviene, primero como disolvente de las substancias minerales del suelo, después como vehículo de estas substancias á través de los tejidos, y finalmente como agente de su reparto en los diferentes órganos. Sabido es, en efecto, que el peso de la materia orgánica elaborada por la planta está en relación con la cantidad de agua que ésta evapora. En un suelo ordinariamente seco no se desarrolla más que una mezquina vegetación, y las plantas que lo ocupan luchan contra la sequedad, ya restringiendo la superficie de sus hojas, ya engrosando su cutícula, ya formando depósitos de agua alojados en un tejido especial de las hojas.

Estas tierras no podrán dar cosechas remunerativas. Nuestras plantas del gran cultivo exigen una cantidad de agua suficiente que debe repartirse en todos los períodos de su evolución. Si el agua es necesaria en el primer desarrollo del vegetal para asegurar el funcionamiento normal de la hoja, considerada como el lugar donde nacen los hidratos de carbono y los albuminoides, es todavía indispen-

sable que el agua intervenga en el momento de la maduración, es decir, en la época del transporte, hacia el óvulo fecundado, de las materias que la hoja ha elaborado. Cuando falta el agua en este período crítico, la semilla no se llena: en el caso de un vegetal con tubérculos ó con raíz carnosa, estos órganos sólo adquieren pequeñas proporciones.

Pero, si el agua es indispensable para la vegetación, debe observarse, como dice con mucha razón de Gasparin, que la propiedad de un suelo de ser húmedo es á menudo muy variable aunque se aplique, según los casos, á suelos de la misma naturaleza. «*Es esencialmente local, se extiende á toda clase de terrenos, cuando procede de una cualidad excesiva del clima. Otras veces, dependerá de su disposición topográfica y abarcará toda una sección de territorio, cualquiera que sea la naturaleza de las tierras. Así, en Arabia, no habrá más que tierras secas que serán arcillosas, arenosas, calcáreas; en Irlanda, no habrá más que tierras húmedas, arcillosas, arenosas, calcáreas. Además, una parte de territorio, situado en una alta planicie será seco, mientras que las pendientes y los valles formados en los mismos terrenos serán húmedos... Así, la humedad del suelo, que es la propiedad física más importante, aquella de que sobre todo debe preocuparse el agricultor, no puede servir de guía para una clasificación y no haría más que hacerla confusa. Figura en primer término en la apreciación de los terrenos; pero, debe ser eliminada en su clasificación.*»

Cualidades físicas de una tierra de labor. — Supongamos que la cantidad de agua que cae en una región determinada sea suficiente. Los vegetales no podrán, sin embargo, utilizar esta agua más que cuando la tierra presentará ciertas aptitudes físicas apropiadas para retenerla. Será preciso, además, que las raíces puedan avanzar debidamente en la masa sólida.

Dehérain, después de de Gasparin, reconoce en la tierra de labor tres cualidades físicas principales. Una tierra debe ser ***permeable, inmóvil*** y ***continua***.

Es ***permeable*** cuando el agua y los gases la atraviesan fácilmente.

Es ***inmóvil*** cuando resiste: 1.°, á la acción del viento, que no debe llevársela; 2.°, á la acción de las heladas, que no deben levantarla.

Es ***continua*** cuando no se agrieta en tiempo de sequedad,

dejando al descubierto las raíces y á veces desgarrándolas.

Una tierra muy ligera, exclusivamente formada por granos de arena, como los que constituyen las dunas, es muy permeable, pero es muy movible por la acción del viento. Es continua, porque la sequedad no la resquebraja. Una tierra muy fuerte, formada sobre todo por arcilla, es poco ó nada permeable para el agua y los gases: es discontinua, porque se agrieta con la sequedad. Una tierra muy calcárea se levanta por la acción de las heladas.

Estas tres clases de tierras, tomadas con sus caracteres extremos son impropias para todo cultivo. El papel de las enmiendas que deben aplicárseles, consiste precisamente en corregir cada uno de los defectos que acabamos de mencionar.

II

PRIMEROS ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

Tierras fuertes; tierras ligeras. — Adquiridas estas nociones preliminares, se trata ahora de sentar las primeras bases de una clasificación de las tierras.

Supongamos por de pronto, con Boussingault, la existencia de casos muy simples. Desde el punto de vista práctico, á menudo se dividen las tierras de labor en dos grandes categorías: *las tierras fuertes* y *las tierras ligeras*.

Las primeras, en las cuales domina la arcilla, son poco permeables, se desecan lentamente y presentan al trabajo del arado ó de la laya una resistencia mayor ó menor. En cambio, si absorben y retienen mucha agua, resisten mejor la sequedad y pueden recibir grandes cantidades de abonos, cuya descomposición es lenta. Si las lluvias son repetidas, estas tierras adquieren un alto grado de humedad: el agua y los gases de la atmósfera no pueden entonces circular en ellas. Cuando, por el contrario, la sequedad es intensa y continua, estas tierras se vuelven muy duras y se agrietan.

Inversamente, las tierras ligeras son muy permeables: su desecación es rápida, su labor fácil. Consumen muchos abonos á causa de su permeabilidad y de la facilidad con que el oxígeno quema la

materia orgánica. Resisten mal la sequedad y, en consecuencia, no pueden dar más que cosechas medianas ó nulas en los años en que la lluvia escasea.

Si todo pasase así de un modo normal, un suelo puramente arcilloso y un suelo puramente arenoso, serían incultivables. «*Los defectos de estas dos especies de terrenos son de tal naturaleza que se compensan, se neutralizan, y de la mezcla de estos suelos extremos resultan tierras reconocidas como las más favorables para el cultivo*» (Boussingault). Los defectos inherentes á las tierras fuertes se corrigen á veces por sí mismos naturalmente, no siempre de una manera absoluta, sino de un modo relativo. Todo depende, en este caso, de la estructura física de la capa en que descansa la tierra de labor, capa que llamamos *subsuelo*.

Subsuelo.—Hemos hecho ya algunas aclaraciones sobre este punto (pág. 196). Sabido es que, generalmente, es difícil distinguir el suelo del subsuelo. El conocimiento de la estructura del subsuelo es de gran importancia; sus cualidades físicas repercuten en alto grado, tanto en las cualidades físicas como en las cualidades químicas del propio suelo.

Boussingault ha hecho sobre este punto las siguientes observaciones. Cuando la constitución mineral del subsuelo es la misma que la del suelo, se puede, mediante labores profundas, aumentar el espesor de la capa de labor á expensas del mismo suelo. Pero, es posible que la tierra pierda entonces momentáneamente su fertilidad y no la recobre hasta pasado bastante tiempo. En efecto, así se pierde, en parte, el humus que contiene la capa de labor, pues cierta cantidad del mismo va á parar á una profundidad mayor ó menor. Además, no se aumenta la riqueza en elementos fertilizantes. El trabajo mecánico de una labor profunda produce solamente un esponjamiento de la tierra en una capa más gruesa y facilita la penetración de las raíces.

Pero, cuando la constitución mineral del suelo y la del subsuelo no son las mismas, lo que ocurre es que cuando el primero está formado por un depósito de aluvión procedente de la disgregación de rocas situadas á una gran distancia, se puede mejorar esta capa por la adición de cierta cantidad de la capa subyacente. Se comprende que esta mejora puede repercutir en las propiedades físicas del suelo en los dos ejemplos que siguen. Una tierra arcillosa es, generalmente, poco permeable; si descansa en un subsuelo arenoso y se incorpora una parte de esta arena á la arcilla de la capa superior, ésta adquirirá cierto grado de permeabilidad. Lo inverso también es cierto. Un suelo muy arenoso y muy filtrante descansará ventajosa-

mente sobre un subsuelo arcilloso. Pero, aquí es ocasión de establecer una distinción relativa á la *inclinación* de la capa arcillosa. Volveremos á este punto.

Si la constitución de un suelo ofrece gran importancia, también es indispensable tener en cuenta la cuestión del clima y la de la orientación. Se debe admitir, con Boussingault, que los terrenos arcillosos convienen en los climas secos, los terrenos arenosos y los calcáreos en los climas húmedos. En estos últimos las soluciones del suelo son poco concentradas; en los climas secos, las soluciones lo son más. Á veces, las mismas substancias solubles se acumulan y pueden cristalizar.

Relaciones del suelo con el subsuelo. — Se pueden esquematizar, como ha hecho Dehérain, estas relaciones recíprocas de la manera siguiente:

Se consideran cuatro casos principales: A. *Tierras ligeras* que descansan: 1.º, sobre un subsuelo permeable; 2.º, sobre un subsuelo impermeable; B. *Tierras fuertes* que descansan: 1.º, sobre un subsuelo permeable; 2.º, sobre un subsuelo impermeable.

Una tierra ligera con subsuelo permeable está á merced de las condiciones del clima. Si éste es seco, la tierra puede ser casi totalmente ó totalmente estéril. Si la tierra es calcárea, se plantarán en ella coníferas que evaporan poca agua. Con el tiempo se podrá disponer así de una capa de humus apreciable. Si el clima es húmedo, ó si estas tierras pueden regarse, es posible que lleguen á convertirse en fértiles. En este último caso, el agua lleva consigo principios fertilizantes, á veces en notable proporción (potasa especialmente). Dehérain aconseja aplicar á estas tierras abono de cuadra, en pequeña cantidad cada vez, pero á menudo.

Las tierras ligeras con subsuelo impermeable pueden ser excelentes en un clima medianamente húmedo, con la condición de que el subsuelo tenga una pendiente que permita el escurrimiento del agua en exceso, ó cuando, mediante trabajos apropiados, se evacuen estas aguas abriendo zanjas. Aun cuando el clima sea seco, estas tierras son de buena calidad si, sobre la capa arcillosa del subsuelo inclinado, corre una capa de agua dulce. Por capilaridad, el líquido asciende al suelo y alimenta á los vegetales que en él se desarrollan.

Pero, si un suelo ligero descansa sobre un subsuelo impermeable horizontal, las cosas cambian: no hay escurrimiento posible. La tierra se satura de agua en invierno y se deseca en verano, tanto

más cuanto menos lluviosa sea esta estación. Un ejemplo clásico de esta disposición tenemos en Gascuña. Antes de que se abrieran las zanjas destinadas á dirigir las aguas, ya á la cuenca de Arcachón, ya á la Gironda, estas landas estaban inundadas en invierno y se volvían secas y cálidas en verano. El escurrimiento de las aguas excedentes y la plantación de pinos marítimos metamorfosearon el aspecto del país. Los pinos, que evaporan poco, encuentran en el verano una cantidad suficiente de agua en la capa impermeable á que llegan sus raíces.

Las tierras fuertes con subsuelo permeable son, en general, excelentes tierras. El defecto que presenta una tierra fuerte, de ser compacta y de retener á veces demasiada agua, se encuentra corregido por la facilidad con que esta agua filtra en el subsuelo. Es necesario dar á estas tierras labores profundas capaces de esponjarlas hasta la capa del subsuelo.

Las tierras fuertes con subsuelo impermeable se vuelven muy húmedas en la temporada de las lluvias y no pueden ser trabajadas. Se impone la instalación de conductos de infiltración: así se transformarán en suelos de muy buena calidad.

Flora espontánea.—Si todas las plantas deben encontrar en el suelo cierto número de principios que son siempre los mismos y cuya existencia está estrechamente enlazada con su desarrollo; si, por consiguiente, tienen *las mismas necesidades cualitativas*, se observa corrientemente que sus necesidades *cuantitativas* son muy distintas. Los suelos naturales incultos se caracterizan por la presencia de vegetales cuya especie varía con la composición de la masa en que se desarrollan.

En un suelo exclusivamente arenoso, exento de calcáreo y poco arcilloso, se encontrarán ciertas Gramíneas pertenecientes á los géneros *Arundo*, *Aira*, *Phleum*; ciertas Ciperáceas *(Corex arenaria)*; luego algunas de las plantas siguientes: *Spergula arvensis*, *Armeria vulgaris*, *Genista scoparia*, *Cytisus laburnum*, *Plantago arenaria*, *Rumex acetosella*, etc. Si el suelo arenoso contiene un poco de humus, se encontrará el brezo *(Calluna vulgaris)*; pero casi nunca se verán allí leguminosas forrajeras. En un suelo calcáreo, por el contrario, abundan las leguminosas: plantas de los géneros *Trifolium*, *Medicago*, *Vicia*, *Anthyllis*, *Lotus*, etc.; y se hallan también: *Reseda luteola*, *Poterium sanguisorba*, *Silene inflata*, diversas plantas del género *Rosa*, y como árboles, el tejo *(Taxus baccata)*, la lantana *(Viburnum lantana)*, etc.

En los suelos margosos se hallan algunas leguminosas; también se encuentran en ellos: *Tussilago farfara*, *Rubus fruticosus*, *R. Caesius*. Los suelos de limos, cuya composición se acerca á la de

una buena tierra franca, nutren á un gran número de especies vegetales que sería demasiado largo enumerar aquí, y cuya nomenclatura puede verse en las Floras especiales de cada región. En cuanto á los suelos turbosos, se encuentran en ellos muchas plantas de los géneros *Cyperus, Carex, Juncus, Scirpus, Eriophorum, Sphagnum,* etc., cuyo valor alimenticio es nulo. Las indicaciones que suministra la observación de estas plantas espontáneas, relativamente á la naturaleza química del suelo, prestan á veces grandes servicios.

Expongamos ahora de un modo sumario los principios generales de algunas clasificaciones: es difícil elegir de una manera absoluta en el presente caso; la elección deberá subordinarse á las condiciones climatológicas de la región.

III

CLASIFICACIÓN DE LAS TIERRAS SEGÚN SUS PROPIEDADES FÍSICAS

Esta clasificación, indicada por Ramann, presenta la ventaja de expresar propiedades determinadas, como son las que se refieren á la capacidad de los suelos respecto del agua. He aquí, brevemente resumidos, los puntos principales.

Según el tamaño de sus partículas, se pueden clasificar los suelos del modo siguiente:

α. **Suelos pedregosos.**—Formados por fragmentos de rocas, con frecuencia voluminosos, difícilmente descomponibles por los agentes atmosféricos, estos suelos están cubiertos de bosques en las regiones húmedas. Los árboles introducen sus raíces en las rendijas de estos fragmentos que se recubren de musgo; así llegan á apoderarse del agua y de las materias salinas indispensables para su crecimiento.

β. **Suelos arenosos.**—La sílice es la materia fundamental de estos suelos; cuanto más predomina menor es su productividad. Estos suelos son muy permeables y generalmente profundos. Su capacidad para el agua es escasa. Se calientan fácilmente y por lo tanto pierden con rapidez el poco líquido que retienen. Las plantas de raíces superficiales se desarrollan mal ó no se dan en ellos; únicamente las plantas de raíces penetrantes pueden buscar bastante lejos la humedad necesaria á su existencia. Si estos suelos, muy filtrantes, están mezclados con arcilla ó humus, su capacidad para el agua aumenta;

si están mezclados con calcáreo y con diversos silicatos, su valor respecto del cultivo es mayor. Por causa de su fácil calentamiento, en los suelos arenosos la vegetación es precoz.

γ. **Suelos de limos.**—Están formados por una mezcla de arena, arcilla y un poco de calcáreo. Constituyen la base de lo que se llama en Francia *la tierra franca*, sobre todo si contienen un poco de humus. Según la riqueza de estos suelos en elementos finos (véase *Análisis físico de los suelos*, pág. 200), su capacidad para el agua varía entre límites muy apartados.

Se calientan tanto menos cuanto más finos son sus elementos y cuanto mayor sea su proporción de agua. La circulación del aire depende de su estado de división y de la profundidad á que éste llega.

δ. **Suelos arcillosos.** — Forman una masa muy plástica cuando son húmedos; cuando son secos, se aglomeran en fragmentos más ó menos duros, difíciles de desmoronar. Hemos dicho antes que un suelo puramente arcilloso sería de cultivo imposible, tanto á causa de sus propiedades físicas que determinan la impermeabilidad y la discontinuidad como por su pobreza en elementos de fertilidad; pero, en cambio, su poder absorbente de las materias salinas es muy elevado. Estas tierras se calientan muy despacio; en los suelos en que predomina la arcilla, la vegetación siempre es tardía. La aereación es tanto más difícil cuanto más abunda la arcilla, y la descomposición de las materias vegetales que se incorporan á esta arcilla es tanto más costosa cuanto más difícil es el acceso del aire. Sabemos que si un suelo de esta clase descansa sobre un subsuelo permeable sus propiedades físicas son modificadas ventajosamente.

ε. **Suelos calcáreos.**—Cuando el suelo es esencialmente calcáreo, su color varía del blanco al gris ó al pardo (óxido férrico). Los suelos calcáreos son permeables al agua y á los gases; sufren con la sequedad y su valor es escaso, porque les faltan la mayor parte de los principios nutritivos indispensables. Cuando las rocas calcáreas que originan estos suelos están mezcladas con arcilla, la tierra adquiere más valor. La plasticidad de estos suelos varía con la cantidad de arcilla que contienen; lo mismo ocurre con su capacidad para el agua. Estos suelos descomponen bien las materias orgánicas y se calientan tanto mejor cuanto más calcáreas son.

ζ. **Suelos húmicos.**—Se da este nombre á los suelos ricos en materias orgánicas. Cuando son silíceos se desecan fácilmente. Son muy permeables (tierras de bosques, tierras de landas y de brezos); si son arcillosos, quedan saturados de agua y se desarrolla en ellos una vegetación especial: juncos, esfagnos, cañas, etc. La riqueza en elementos fertilizantes es escasa; están faltos de ácido fosfórico y sobre todo de calcáreo. Su cultivo no puede emprenderse más que después de mejoras físicas y químicas muy importantes.

La clasificación que acabamos de exponer es ventajosa cuando se quiere apreciar la naturaleza de los trabajos mecánicos á que conviene someter el suelo; indica cuál es el grado de permeabilidad de la tierra, pero no nos informa respecto de la verdadera riqueza del suelo en elementos fertilizantes. Requiere, pues, ser completada.

IV

CLASIFICACIÓN DE DE GASPARIN

Se podría dar á esta clasificación el nombre de *físico-química*.

¿Cuál es la substancia que imprime á las llamadas *tierras de labor* sus caracteres principales? De Gasparin hace notar que las tierras calcáreas, por la acción que ejercen sobre los abonos, ponen á éstos rápidamente en estado de servir de alimento á las plantas. Si una tierra no es calcárea, los abonos quedan en ella sin utilizar. El calcáreo, ya exista naturalmente en el suelo, ya proceda de un encalado ó de una adición de marga, cambia de una manera absoluta las condiciones de la vegetación y permite obtener cosechas productivas. Así, de Gasparin admite, en principio, dos grandes clases de tierra: *las tierras calcáreas* y *las tierras no calcáreas.* Al lado de estas dos grandes clases, admite dos grupos particulares: *las tierras arcillosas* y *las tierras en que domina el elemento húmico.*

Resumamos rápidamente las principales líneas de esta clasificación, añadiendo algunas observaciones de Dehérain.

Subdivisión de las tierras calcáreas. — α. TIERRAS DE LIMOS.—Un limo (1) contiene una mezcla de arena, calcáreo y arcilla con pequeñas cantidades de humus. En estado natural se cubre de hierbas: gramíneas que dan buenos forrajes, trébol blanco. Las buenas tierras de limos gozan de las propiedades que hemos señalado anteriormente: la permeabilidad, la inmovilidad, la continuidad. Los limos que poseen estas cualidades se llaman *limos muelles.* Dehérain

(1) Empleamos la palabra *limo* por no encontrar otra mejor que equivalga á la francesa *limon* y á la alemana *Lehm.*—C. B.

cree que con 30 por 100 de arcilla y de tierra fina, la tierra de limos, llamada todavía *tierra franca*, es capaz de almacenar una proporción de agua formidable. Si la arena gruesa llega á 50 por 100 y la arena fina sólo á 20 por 100, la permeabilidad está asegurada: pero, la desecación de la tierra es demasiado rápida. Una tierra franca no debe contener bastante arcilla para que la desecación produzca una contracción en ella.

Cuando la arcilla existe en cantidad demasiado pequeña, si predominan la cal y la sílice, la tierra pasa á ser ligera; á este género de suelos de Gasparin les dió el nombre de *limos inconsistentes*. Estos suelos (arenocalcáreos de Dehérain) se desecan muy rápidamente. Son continuos, pero á menudo móviles.

Cuando predomina la arcilla, el limo es tenaz. Como tipo de este limo, de Gasparin cita el limo del Nilo, de color amarillo pardusco, que se adhiere mucho á la lengua. Este limo presenta en su composición grandes variaciones según los sitios donde se le recoge. Debe su fertilidad á la notable proporción de humus que contiene.

Cuando el calcáreo escasea, la tierra se llama *arcillosilícea*. Dehérain observa que esta tierra puede ser impermeable á los gases y al agua, pero conserva bien la humedad que ha recibido. A causa de su pobreza en calcáreo este suelo á menudo será móvil; se volverá discontinuo con la sequedad. La adición de marga y de cal corrige estos dos inconvenientes; los abonos orgánicos abundantes también pueden disminuir la plasticidad de la arcilla. El escurrimiento del exceso de aguas se hará por medio de conductos de infiltración *(drainage)*.

β. Tierras arcillocalcáreas. — Según de Gasparin, grandes extensiones de terrenos «*formados por restos calcáreoarcillosos, se encuentran en formaciones geológicas diferentes, en cuencas dominadas por el calcáreo jurásico, la creta, las formaciones de agua dulce ó en los aluviones de los ríos que de allí derivan*». Estas tierras son buenas para el trigo, y apropiadas para prados artificiales. Cuando hay en ellas praderas naturales, el heno es de excelente calidad.

Estas tierras son menos permeables que las tierras francas, pero son continuas é inmóviles.

γ. Tierras cretáceas.—Desde el punto de vista agrícola, las cretas están caracterizadas por la abundancia del elemento calcáreo, mezclado con un poco de arcilla y de arena silícea. Son permeables, se desecan pronto, se levantan fácilmente con las heladas y el viento las arrastra. Los suelos puramente calcáreos son absolutamente estériles en los países cálidos; en cambio, se recubren de hierbas en las comarcas húmedas. Descomponen con facilidad las materias orgánicas; la nitrificación es en ellos intensa, pero los nitratos son fácilmente disueltos por las lluvias.

Según de Gasparin, la alfalfa y el pipirigallo son los forrajes que más convienen á los terrenos cretáceos; el trigo también puede darse en ellos con ventaja. Se llaman *cretas frescas* las que comunican por su fondo con una capa de agua. Si el subsuelo en que descansa la creta es impermeable, se tiene la *creta seca* con todos sus inconvenientes.

Subdivisión de las tierras no calcáreas.— α. Tierras silíceas. — Formadas por restos de rocas desprovistas de calcáreo. estas rocas se hallan en el fondo del mar, en las orillas de los ríos. Las dunas representan un tipo de tierra silícea. Este género de suelo es muy permeable; no almacena la humedad. Es muy móvil y, si el clima es seco, su fertilidad es muy escasa. Algunos árboles resinosos (pinos) se desarrollan bien cuando la profundidad del suelo es suficiente.

Pero, cuando estas tierras son regadas, ó cuando están situadas en un clima naturalmente húmedo, pueden dar excelentes resultados. sobre todo si se emplean en abundancia los abonos orgánicos. En este último caso son especialmente apropiadas para huertos.

β. Tierra de greda.—De Gasparin incluye en esta clase las tierras formadas por una mezcla de arcilla y una cantidad mayor ó menor de sílice libre, pero que no puede pasar de 55 por 100. Es conveniente hacer aquí una observación sobre la palabra *arcilla*. Los métodos físicos de análisis del suelo que empleaba este autor no tenían la precisión de los actuales. Lo que él llama arcilla es, como hemos indicado ya anteriormente (página 107). una mezcla de arcilla coloide con residuos silíceos á veces muy abundantes. De manera que la proporción de verdadera sílice, contenida en las gredas, debe exceder ciertamente del 55 por 100.

Cuando predomina la arcilla, estas tierras son aptas para dar muy buenas cosechas si, gracias á una inclinación suficiente, las aguas pluviales pueden escurrirse. Si predomina la arena fina, estas tierras serán muy compactas después de haber llovido; si la sílice está en granos más gruesos, la tierra se deseca fácilmente y toma el carácter de las tierras silíceas. En principio, cuando la arcilla es abundante, la tierra es pobre en elementos de fertilidad.

De Gasparin distingue en este grupo:

1.° *Las gredas inconsistentes*. Contienen mucha sílice y tienen poca tenacidad, sobre todo si predomina la arena en granos gruesos. Secas en verano, saturadas de agua en la temporada de las lluvias, estas tierras convienen para bosques.

2.° *Las gredas muelles*. Cuando las tierras están formadas por esquistos micáceos, retienen bien la humedad, que escurren fácilmente. Si domina la sílice son ligeras y entran en la categoría de las tierras silíceas. Los castaños se dan bien en estos suelos. Con el nombre de *gredas muelles volcánicas*, de Gasparin comprende los

terrenos formados por restos basálticos. Estos terrenos son permeables, pero retienen, sin embargo, una cantidad de agua suficiente; son ricos en potasa y en sosa y muy fértiles (campiña de Nápoles, Limagne de Auvernia).

3.° *Las gredas tenaces.* Forman una pasta en que la reja del arado no puede penetrar cuando están húmedas; resisten también á las labores cuando están secas porque entonces forman una masa muy dura. Estas tierras son discontinuas durante la sequedad; se saturan de agua durante el invierno. «*Son de difícil cultivo y, cuando no tienen una inclinación suficiente, deben disponerse en caballones.*»

γ. TIERRAS ARCILLOSAS. — De Gasparin incluye en esta categoría las tierras que contienen 85 por 100 de arcilla á lo menos. Su tenacidad es tal que todo cultivo es imposible.

δ. TIERRAS DE BASE ORGÁNICA (mantillo, humus). — El carácter principal de estas tierras es el de perder, una vez desecadas, más del quinto de su peso por combustión.

De Gasparin distingue los *mantillos dulces* (tierra de jardín), formados por restos vegetales en el fondo de los estanques y pantanos en un suelo calcáreo, y los *mantillos ácidos*. Estos últimos, hervidos con agua, dan un líquido que enrojece el papel azul de tornasol. A esta categoría corresponden: 1.° *Las tierras de bosque* que, para ser cultivadas requieren después de su roturación una aplicación de cal ó de marga. 2.° *Las tierras de brezo*. Éstas contienen restos enteros de plantas; difieren de las tierras de bosque por su naturaleza silícea. Se sabe que la tierra de brezo conviene á muchas plantas (especialmente á las plantas de invernáculos). Si se quiere que en estas tierras se desarrollen otros vegetales distintos de los que ordinariamente ellos nutren, se las debe someter al encalado ó artigarlas. Esta última operación consiste, como se sabe, en quemar la capa superficial del suelo cubierta de hierbas ó de plantas leñosas y en esparcir luego las cenizas. Se enriquecerán, además, estas tierras, aplicándoles abono de cuadra. 3.° *Las tierras turbosas.* Hemos indicado anteriormente el origen de las turberas (página 275). Una turbera se llena de agua durante el invierno; no se puede conseguir que los líquidos escurran más que abriendo zanjas profundas y próximas unas á otras. Las modificaciones químicas que conviene hacer sufrir á las turberas son las del encalado y de la aplicación de marga.

La clasificación de que acabamos de exponer solamente las grandes líneas, presenta reales ventajas desde el punto de vista práctico. Con ayuda del solo análisis físico, se puede, generalmente, incluir un suelo dado en una de las categorías

que hemos mencionado, y saber, por consiguiente, cuáles son las modificaciones físicas y químicas que hay que hacerle sufrir para convertirlo en suelo cultivable. Ya se comprende que la cuestión del clima (régimen de las aguas, temperatura, orientación, etc.) debe ser tomada en consideración; porque una tierra que entra en uno cualquiera de los grupos que acabamos de estudiar podrá dar en un clima cosechas satisfactorias, mientras que, en otro, su fertilidad será mucho menor.

V

CLASIFICACIÓN QUÍMICA

Se ha intentado á veces establecer una clasificación de los suelos según *la cantidad de materias asimilables que contienen en un peso determinado de tierra*. Pero se tropieza entonces con numerosas dificultades. Por ejemplo, ¿se deberá poner en primer término la tierra que contiene más principios fertilizantes en menos peso? Sería preciso entonces suponer que conocemos el grado de *asimilabilidad* de todas las substancias que se encuentran en una muestra dada de esta tierra. Hemos expuesto, á propósito del análisis químico de los suelos, las dificultades, á veces invencibles, que presenta esta noción de asimilabilidad. Se sabe que no es la riqueza absoluta de un suelo en tal ó cual substancia lo que importa conocer, sino *la fracción de esta substancia que las plantas pueden utilizar inmediatamente*. Esto es especialmente cierto por lo que toca al nitrógeno, tan abundante en las tierras húmicas, pero tan poco aprovechable para la mayor parte de los vegetales mientras este principio no haya sufrido ciertas transformaciones que deben convertirlo en estado de nitrógeno mineral difusible. Además, un suelo que el análisis químico había hecho considerar como pobre en una materia fertilizante, podrá, en efecto, no dar más que medianas cosechas con un vegetal, pero dará cosechas mucho más satisfactorias con otro cuyas necesidades minerales serán,

desde el punto de vista cuantitativo, diferentes del primero. Sucederá muy á menudo también que un suelo, clasificado desde el punto de vista químico como suelo pobre, dará, en un año caliente y húmedo, productos superiores á los de un suelo mejor provisto de materias fertilizantes, pero falto de agua.

En fin, y no se repetirá demasiado, si un suelo, aun poco rico, es muelle en un gran espesor, si el subsuelo es permeable y si el volumen del agua pluvial que recibe es suficiente, la planta buscará en profundidad lo que no encuentra en anchura. Su desarrollo será frecuentemente más satisfactorio que el de una planta de la misma especie que haya vegetado en un suelo mucho más rico, pero de poca profundidad y, por esto, sometido á las variaciones meteorológicas de sequedad ó de humedad excesivas.

Una clasificación *química* de las tierras sería, pues, ilusoria; las propiedades físicas del suelo tienen tanta influencia en sus cualidades químicas, como hemos dicho tantas veces, que la mayor parte de los elementos de fertilidad indispensables quedarían sin empleo si no sufriesen ciertas modificaciones debidas únicamente á la acción de los agentes físicos. Es un hecho reconocido en todos tiempos: las labores frecuentes que se dan á una tierra constituyen una fuente de enriquecimiento.

VI

CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA

Habríamos podido empezar por esta clasificación que, de momento, parece ser la más racional y la más científica.

Esta clasificación, que divide los suelos en dos grandes grupos, la hemos abocetado ya al principio del segundo capítulo de este pequeño libro (página 14).

A. **Suelos primitivos.**—Son los que descansan todavía sobre la roca que los ha originado. Estos suelos están desprovistos de los elementos que la roca no contiene.

En esta primera categoría deben colocarse los suelos procedentes de la destrucción en el mismo punto de las rocas cristalinas: granito, pórfiro, gneis, micasquistos, muy pobres en cal y en ácido fosfórico, ricos en potasa. Si la roca primitiva contiene anfibol, piroxeno, hornblenda, los suelos estarán mejor provistos de cal. Cuando la roca primitiva es de origen volcánico (traquitas, basaltos), sus restos serán mucho más ricos en elementos fertilizantes (cal, ácido fosfórico). Pero, conviene también tener en cuenta el grado de finura de los fragmentos. Los gruesos quedan cerca de la roca madre: generalmente no pueden sostener más que una vegetación mezquina, dada la pequeñez de su superficie respecto de su volumen. Cuando los elementos rocosos, por efecto del trabajo mecánico de la desagregación, son más menudos, son arrastrados por las aguas de lluvia á mayor distancia y pueden proporcionar á los vegetales condiciones de desarrollo más favorables. En efecto, sus elementos de fertilidad quedarán poco á poco al descubierto en una superficie tanto más considerable cuanto más perfecta haya sido la disgregación.

B. **Terrenos de aluvión.**—Estos terrenos no descansan ya sobre la roca primitiva. Están formados por restos, con frecuencia muy variados, que el agua ha arrastrado más ó menos lejos de su lugar de origen según la velocidad de la corriente y el grado de finura de las partículas sólidas.

A esta categoría pertenecen los *suelos arcillosos* procedentes de la acción química de las aguas naturales sobre las rocas cristalinas primitivas; los *suelos arenosos*, procedentes de rocas en que dominen los elementos silíceos; los *limos*, procedentes de la mezcla de los dos anteriores; los *suelos calcáreos*, procedentes de la carbonatación de la cal contenida en las rocas primitivas con disolución subsiguiente en estado de bicarbonato y pérdida después del exceso del gas carbónico; los *suelos margosos*, procedentes de una mezcla de arena, arcilla y calcáreo.

Conviene hacer notar que esta clasificación no presta apenas servicios desde el punto de vista práctico. Se encuentran, en efecto, suelos de la misma naturaleza en los dos grandes grupos que hemos admitido: la arcilla, el limo, la marga, pueden encontrarse sobre la roca primitiva de que han nacido, ó en un lugar próximo á ella. Por consiguiente, por lo que toca á la nutrición de la planta, es indiferente saber si un suelo determinado está más ó menos lejos de su punto de origen. Además, no se hace mención de la materia orgánica. De todos modos, ciertos aluviones son especialmente ricos en materias fertilizantes porque resultan de la mezcla de una infinidad de fragmentos de rocas cuya composición química es muy variada. A causa de esta variedad, y del grado de finura que presentan sus partículas, se comprende que muchas tierras formadas por depósitos de aluviones se distingan por su notable fertilidad.

Importancia de la geología aplicada á la agricultura.—Si resulta poco afortunada una clasificación estrictamente geológica, no es menos cierto que los estudios geológicos son los que proporcionan los mejores datos respecto de la calidad física y química de los terrenos. Inspirándose en las ideas de su maestro E. Rissler, Hitier ha escrito con razón: «Entre las formaciones geológicas y la vegetación existen estrechas relaciones que se explican por el hecho de que una misma formación geológica origina, en general, tierras agrícolas de cualidades análogas, porque contienen los mismos elementos en proporciones poco más ó menos uniformes... Dos países de constitución geológica diferente presentan, por este hecho, tanto en su aspecto exterior como en sus suelos y los sistemas de cultivo que en ellos se emplean, profundas diferencias. En cambio, dos países situados en Francia, ó uno en Francia y otro en el extranjero, por lejanos que sean, si tienen la misma constitución geológica, presentan, con el mismo aspecto externo, la misma agrupación de las habitaciones, la misma tierra y los mismos sistemas de cultivo.»

«Abundancia ó escasez de recursos, presencia ó ausencia de capas de agua subterráneas contenidas en el subsuelo, profundidad á que se mantiene esta capa de agua, permeabilidad de los terrenos: todas estas condiciones dependen estrechamente de la constitución geológica del país.»

Haciendo una justa crítica de las antiguas clasificaciones, Risler observa que la división de las tierras en *tierras francas, arcillosas, arenosas*, etc., no puede bastar: «Hay sílice y sílice. Hay toda suerte de arcillas. Hay también toda clase de calcáreos: la creta no se parece al calcáreo coralino y ésta tampoco se parece al calcáreo grueso de los alrededores de París. Las tierras que derivan de los unos ó de los otros difieren en su composición química y en sus propiedades físicas: no tienen la misma profundidad, ni el mismo subsuelo... Apoyándose en la geología, las antiguas clasificaciones podrán ser útiles á los agricultores: volviéndose realmente más científicas, serán á la vez más prácticas.» También admite Risler, con A. de Lapparent, que el mejor mapa

agronómico de una región es su mapa geológico con más pormenores.

Sin embargo, no parece que los solos mapas geológicos hayan prestado siempre á los agricultores los servicios que había derecho á esperar de ellos. En esta obra, muy á menudo hemos indicado que el suelo, con sus propiedades físicas y químicas, no era el único factor que entraba en juego cuando se trata de fijar las condiciones de éxito de un cultivo determinado. Las cuestiones del régimen de las aguas, de la temperatura, de la situación geográfica, intervienen inmediatamente para modificar, á menudo profundamente, las cualidades de este suelo y, por lo tanto, su rendimiento económico.

En un verdadero mapa agronómico deberían estar fielmente anotadas todas las particularidades que imprimen á una región su fisonomía especial: tal es el objeto que se ha propuesto alcanzar un agrónomo alemán, Hazard, respecto de cierta región del reino de Sajonia (*Landw. Jahrb.*, tomo XXIX, pág. 805; 1909). No podemos aquí hacer otra cosa que apuntar un tema que más bien corresponde al dominio de la agricultura general.

El autor considera el suelo, el clima, la situación geográfica. Se sabe que, para producir un kilogramo de materia seca, los vegetales deben disponer de un peso de agua que varía de 300 á 700 kilogramos: existen, pues, en este punto, oscilaciones muy notables. Hazard clasifica las plantas del gran cultivo y los árboles forestales, según sus exigencias en agua. No considerando, para abreviar, más que las plantas principales de la primera categoría, se pueden agrupar, por orden de sus exigencias crecientes en agua, de la siguiente manera: patatas, centeno, avena, trébol encarnado y cebada, trigo y remolachas. Pero, si el agua desempeña un papel capital en la producción de la materia seca, la temperatura media tiene también una importancia de primer orden que se ha tenido en cuenta. Por medio del análisis físico, el autor determina la naturaleza y las proporciones de los elementos

capaces de influir en la distribución del agua en el suelo, es decir, de retener este líquido y ponerlo á disposición de las raíces. Los mapas de Hazard comprenden: un *mapa litológico* que informa respecto de la estructura geológica del suelo: *un mapa del suelo,* fundado en el anterior, y en el cual están anotadas las propiedades físicas del suelo, la pendiente del terreno, las condiciones climatológicas, los datos del cultivo que sólo proporciona la práctica y los que dan los ensayos de laboratorio. En este mapa figuran los cinco tipos principales de tierras capaces de nutrir á los vegetales antes mencionados. *Un mapa de distribución del suelo* enseña la extensión que debe ocupar cada cultivo: se completa con un *mapa de alternativa de cosechas,* correspondiente á las condiciones económicas de la región considerada.

Resulta de lo que precede que existen, en una comarca, tierras de trigo, tierras de remolachas, tierras de patatas, etc., y que se puede indicar, por adelantado, mediante estudios bien dirigidos, cuál es la planta que conviene cultivar de preferencia y con la cual se obtendrían resultados satisfactorios, con exclusión de otra. Se encuentra, pues, aquí un conjunto de datos que se completan mutuamente, susceptibles de guiar al agrónomo en la elección de cultivos racionales.

Conclusiones.—Supongamos que un suelo determinado posee todas las cualidades físicas capaces de asegurar el perfecto desarrollo de una planta dada: supongamos también que recibe en tiempo oportuno el volumen de agua necesaria para alimentar la planta. Sin embargo, estas dos condiciones no son las únicas que deberán tenerse en cuenta: será necesario, además, que el suelo contenga una proporción de materias alimenticias capaces de satisfacer las exigencias del vegetal. Pues bien, sabemos que el análisis químico de un gran número de tierras de labor indica una provisión de nitrógeno, ácido fosfórico, potasa, cal, etc., que, calculada para la superficie de una hectárea, y para una profundidad de unos 40 centímetros, puede parecer suficiente para satisfacer las exigencias de la mayor parte de las plantas del

gran cultivo. Sin embargo, la práctica enseña que muchos suelos en que se encuentra esta riqueza global no dan á menudo más que cosechas medianas. Hemos explicado muchas veces este punto: dada la provisión, á veces considerable, de un elemento indispensable, sólo una fracción de ella, á veces muy pequeña, se encuentra en forma tal que la planta pueda asi milarla inmediatamente.

Existen, pues, *tierras completas* y *tierras incompletas*. Las primeras, por razón de su origen, pueden proporcionar, sin que sea útil añadirles nada, cosechas remuneradoras durante un gran número de años; mientras que las segundas reclaman la adición de una ó muchas materias fertilizantes que les faltan, ó que contienen en proporciones demasiado escasas.

Según Risler, en un territorio agrícola de 50 millones de hectáreas que comprende Francia, apenas hay la quinta parte de esta superficie que posea tierras completas, es decir, que contengan, por su origen geológico, bastante ácido fosfórico, potasa, etc., para subvenir las necesidades de buenas cosechas de trigo, de raíces, de trébol ó de alfalfa. Las cuatro quintas partes del suelo agrícola de Francia constituyen, pues, tierras incompletas, cuya mayor parte está falta sobre todo de ácido fosfórico.

No nos incumbe exponer aquí á qué se destinaban estas tierras antes, cuando se ignoraban las causas de su esterilidad. Risler ha tratado este asunto con mucha amplitud (1).

Dos medios tenemos á nuestra disposición para luchar contra la esterilidad parcial ó total de un suelo: 1.°, la aplicación al suelo, como materias fertilizantes, de substancias extrañas destinadas á nutrir al ganado y á servirle de abono; 2.°, el empleo de los abonos químicos.

Las plantas extrañas á la finca son las que se encuentran en las aguas del mar (fucus, varecs), en los prados, en los bosques, en las landas. Se pueden emplear estas plantas directamente como abonos ó enterrándolas en el suelo: así se fecunda una tierra á expensas de otra. Esta última se empo-

(1) *Géologie agricole*, tomo IV, pág. 379, París, 1898.

brece, pues, á no ser que, mejor favorecida que la tierra que se quiere cultivar, reciba aguas de riego que mantengan su riqueza, ó esté situada en ciertos valles donde se han acumulado, á fuerza de tiempo, grandes cantidades de materias fertilizantes: tal es el caso de muchos prados naturales. Generalmente, las plantas de las praderas viven para alimentar el ganado: así se transforma la materia vegetal en carne muscular, en leche y en grasa, y la finca rústica se enriquece solamente con el estiércol del ganado. Muy extendida aún en la actualidad, esta práctica permite mejorar poco á poco extensiones considerables de tierra; ésta era la única manera á que se acudía antes instintivamente, cuando eran desconocidas las leyes de la producción agrícola.

Sin embargo, el empleo exclusivo de materias vegetales ó del estiércol en suelos pobres, no permite el cultivo intensivo. Las transformaciones que sufren estos abonos orgánicos son lentas: no pueden poner en libertad cada año, en una forma realmente asimilable para la planta, más que una fracción bastante pequeña de los elementos de fertilidad que estos abonos contienen en potencia. El nitrógeno orgánico, especialmente, no toma el estado de nitrógeno nítrico más que en una proporción insuficiente para alimentar una buena cosecha de trigo, á no ser que se disponga de enormes masas de estiércol, lo que no ocurre generalmente. Además, es necesario suponer que el suelo de la finca que se desea mejorar contiene una proporción conveniente de calcáreo.

Desde hace cincuenta años, los abonos químicos que fabrican las industrias (sales amónicas, materias nitrogenadas inutilizables para la alimentación, que se someten á ciertos tratamientos), ó los que se encuentran en abundancia en algunos puntos del globo (nitratos, sales potásicas), han producido una transformación radical en el arte del cultivo.

Actualmente es fácil suministrar al suelo, en poco peso, la substancia fertilizante que le hace falta, y esto en una forma soluble que utiliza directamente la planta: sería superfluo enumerar aquí los notables resultados obtenidos en este sentido. Sin embargo, nunca se recordará bastante que los abonos químicos no deben emplearse de una manera exclu-

siva: el empleo del estiércol ó el de los abonos verdes, unido de un modo prudente á la aplicación de los abonos químicos, da siempre resultados superiores á los que producen los abonos químicos solos. Ninguna regla general puede formularse sobre este particular, porque este punto especial depende de demasiadas circunstancias variables: situación económica, naturaleza del suelo, influencia del clima, especies vegetales cultivadas. A pesar de las innegables ventajas que lleva consigo la aplicación de los abonos químicos, no debe creerse que representan por sí solos una fuente inagotable de fecundidad, aun suponiendo que se aplican en abundancia. La estructura física y la constitución química del suelo al que se incorporan, desempeñan un papel capital en la manera como son retenidos por las partículas térreas primero, antes de ser absorbidos por el vegetal después. Para no citar más que un ejemplo, sería inútil aplicar sales solubles potásicas ó amónicas á un suelo arenoso desprovisto de calcáreo: el agua pluvial se llevaría estas sales, que no serían retenidas por ninguna propiedad absorbente.

Tanto si se trata de la aplicación de un abono, como del cultivo de una planta, siempre se va á parar á la noción fundamental en materia de química agrícola, de que las propiedades físicas de un suelo son, en suma, las que conviene estudiar con mayor cuidado á fin de modificarlas, si se juzga necesario, para dirigir una explotación á un fin determinado. La utilización por la planta de las riquezas alimenticias que contiene una tierra, está siempre subordinada á las condiciones físicas del medio ambiente. Ojalá que hayamos conseguido demostrarlo en las páginas de esta pequeña obra.

ÍNDICE ALFABÉTICO

A

ÍNDICE DE MATERIAS

CAPÍTULO PRIMERO

CAPÍTULO II

CAPÍTULO III

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO V

CAPÍTULO VI

CAPÍTULO VII

CAPÍTULO VIII

CAPÍTULO IX

CAPÍTULO X

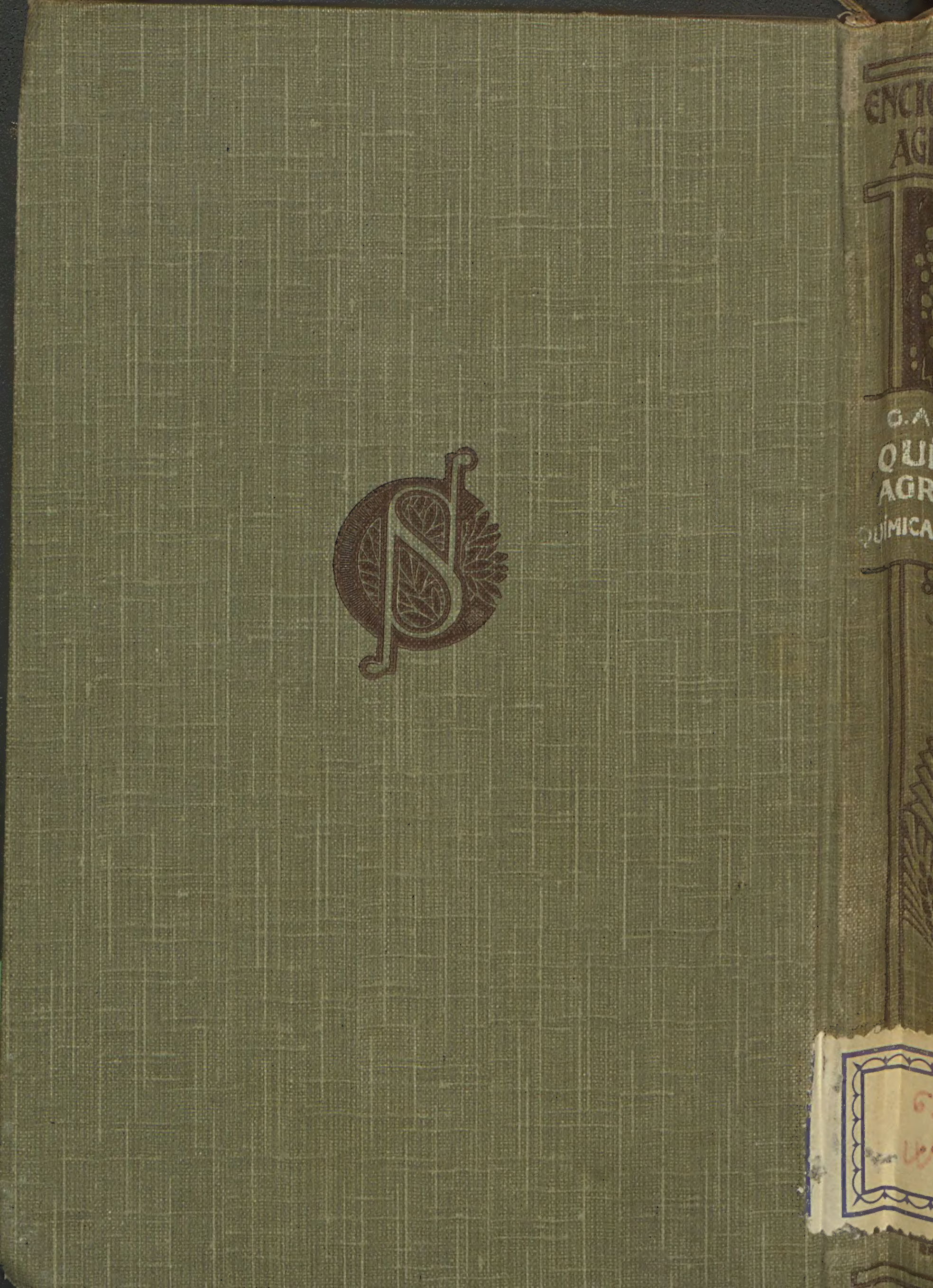
CAPÍTULO XI

CAPÍTULO XII

Aplicaciones del estudio de la constitución química y biológica de los suelos. Aguas de infiltración

CAPÍTULO XIII

Estudio de los suelos formados donde se hallan. Clasificación de los suelos


QUÍMICA